

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a realizace kolineární antény pracující v kmitočtovém
pásmu 868 MHz**

Design and Realisation of Collinear Antenna at 868 MHz

2020

Radovan Sahánek

Zadání bakalářské práce

Student:

Radovan Sahánek

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh a realizace kolineární antény pracující v kmitočnovém pásmu 868 MHz

Design and Realisation of Collinear Antenna at 868 MHz

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Využití pásma 868 MHz v souvislosti s rozvojem nových technologií internetu věcí značně roste. Pro kvalitní příjem signálu je důležité vybavit přijímače (přístupové body) všesměrovou anténou s co nejlepším ziskem. Práce si klade za cíl popis, návrh a výrobu všesměrové antény pracující v pásmu 868 MHz.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište varianty kolineární antény.
2. Proveďte návrh a simulace antény ve vhodném simulačním programu.
3. Realizujte praktický model antény v pásmu 868 MHz.
4. Proveďte správnost návrhu a konstrukce měření. Výsledky měření vyhodnoťte.

Seznam doporučené odborné literatury:


[1] BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Olomouci dne: 28. dubna 2020


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Marku Dvorskému, PhD. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje problematice návrhu a samotné realizaci všesměrové kolineární antény pracující v kmitočtovém pásmu 868 MHz. V teoretické části práce pojednává o základních pojmech a parametrech v oblasti antén včetně principu její činnosti. V praktické části se zabývá návrhem, simulací a samotnou realizací antény v zadaném kmitočtovém pásmu. V poslední části práce je správnost praktického návrhu ověřena měřeními vybraných parametrů sestavené antény. Výsledkem této práce je funkční všesměrová kolineární anténa, kterou je možné použít v kmitočtovém pásmu 868 MHz.

Klíčová slova

Kolineární anténa; CST studio; zisk; S_{11} ; všesměrová anténa

Abstract

This bachelor thesis deals with design and realization of omnidirectional collinear antenna working in the 868 MHz frequency band. The theoretical part deals with basic concepts and parameters in the field of antennas, including the principle of its operation. The practical part deals with the design, simulation and actual implementation of the antenna in the specified frequency band. In the last part of the thesis, the accuracy of the practical design is verified by measuring selected parameters of the assembled antenna. The result of this work is a functional omnidirectional collinear antenna that can be used in the 868 MHz frequency band.

Key words

Collinear antenna; CST studio; gain; S_{11} ; omnidirectional antenna

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
ϵ_r	[-]	Relativní permitivita
η	[%]	Účinnost antény
λ	[m]	Vlnová délka
a	[mm]	Průměr vodiče
b	[mm]	Průměr dielektrika
c	[mm]	Přeměr stínění
c	[m/s]	Rychlost světla ve vakuu
d	[mm]	Průměr PVC obalu
f	[Hz]	Frekvence
G	[dBi]	Zisk antény
I_{vst}	[A]	Vstupní proud
k	[-]	Činitel krácení
l	[mm]	Délka segmentu
o	[mm]	Odstup segmentů
P_0	[W]	Výkon měřený
P_1	[W]	Výkon referenční
P_{vst}	[W]	Vstupní výkon
$P_{výst}$	[W]	Výstupní výkon
r	[mm]	Délka přesahu vodiče
R_{vst}	[Ω]	Vstupní činný odpor
R_{vyz}	[Ω]	Vyzařovací odpor
R_{ztr}	[Ω]	Ztrátový odpor
s	[mm]	Segment s přesahem vodiče
S_{11}	[dB]	Vstupní činitel odrazu
t	[mm]	Přesah dielektrika
U	[V]	Napětí
U_0	[V]	Napětí měřené

U_1	[V]	Napětí referenční
U_{vst}	[V]	Vstupní napětí
X_{vst}	[Ω]	Vstupní reaktance antény
Z	[Ω]	Impedance
Z_{vst}	[Ω]	Vstupní impedance

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
CST	Computer Simulation Technology
EM	elektromagnetické
H	Henry
Hz	Hertz
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific, Medical
LoRa	Long Range
PSV	Poměr stojatých vln
PVC	Polyvinylchlorid
R&S	Rhode and Swarzs
SWR	Standing Wave Ratio
TDS	Time Domain Solver
UV	Ultraviolet
vf	Vysoko frekvenční
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Příklad rádiového přenosu	2
Obrázek 1.2: Stojatá vlna na vedení pro různé PSV	4
Obrázek 1.3: Diagram směrové antény	5
Obrázek 1.4: Diagram všesměrové antény	5
Obrázek 1.5: Ukázka šířky pásma	6
Obrázek 2.1: Kolineární anténa	7
Obrázek 2.2: Varianty kolineární antény	8
Obrázek 2.3: Franklinova anténa s pahýlovým vedením	9
Obrázek 2.4: Ukázka drátové kolineární antény	9
Obrázek 2.5: Detail propojení jednotlivých sekcí	10
Obrázek 2.6: Hrníčková kolineární anténa	11
Obrázek 2.7: Kolineární mikropásková a patch anténa	11
Obrázek 3.1: Návrh koaxiální kolineární antény	12
Obrázek 3.2: Detail koaxiálního kabelu AIRCELL 7	13
Obrázek 3.3: Pracovní prostředí programu CST	15
Obrázek 3.4: Vytvořený model v programu CST Studio	16
Obrázek 3.5: Detail koaxiálního kabelu	17
Obrázek 3.6: Detail odstupu elementů	17
Obrázek 3.7: Frekvenční závislost parametru S_{11} před optimalizací	18
Obrázek 3.8: Frekvenční závislost parametru S_{11} po optimalizaci	18
Obrázek 3.9: Anténa s krytem	19
Obrázek 3.10: Funkce Parametr Sweep pro permitivitu prostředí ϵ_r	20
Obrázek 3.11: Výsledná hodnota frekvenční závislosti parametru S_{11}	20
Obrázek 3.12: Výsledný poměr stojatých vln VSWR	20
Obrázek 3.13: 2D model výsledné směrovosti antény	21
Obrázek 3.14: 3D model výsledné směrovosti antény	21
Obrázek 3.15: Rozdíl hodnoty S_{11} v závislosti na přítomnosti PVC bužírky	22
Obrázek 4.1: Zhotovené elementy antény	24
Obrázek 4.2: Detail napojení elementů	24
Obrázek 4.3: Napojení N female koncového konektoru	25
Obrázek 4.4: Parametr S_{11} po doladění antény	27
Obrázek 4.5: Realizovaná a doladěná anténa	28
Obrázek 4.6: Průběh měření v laboratoři	29
Obrázek 4.7: Graf průběhu parametru S_{11} naměřený v laboratoři	30
Obrázek 4.8: Graf porovnání průběhu parametru S_{11} při simulaci a měření	30
Obrázek 4.9: Realizace měření zisku substituční metodou	31
Obrázek 4.10: Schéma zapojení pro měření zisku	32

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Souhrn hodnot	14
Tabulka 4.1: Parametry antény ke konstrukci	23
Tabulka 4.2: Vliv délky l segmentu na frekvenci antény.....	26

Obsah

Úvod.....	1
1 Anténa a její základní vlastnosti	2
1.1 Dělení antén.....	3
1.2 Parametry antén	3
1.2.1 Vstupní impedance	3
1.2.2 Poměr stojatých vln.....	4
1.2.3 Směrovost antény	5
1.2.4 Účinnost antény.....	6
1.2.5 Zisk antény.....	6
1.2.6 Šířka pásma.....	6
2 Kolineární anténa	7
2.1 Princip a konstrukce.....	7
2.2 Varianty kolineární antény	8
2.2.1 Franklinova anténa	9
2.2.2 Drátová kolineární anténa	9
2.2.3 Koaxiální kolineární anténa	10
2.2.4 Hrníčková kolineární anténa	10
2.2.5 Kolineární mikropásková anténa.....	11
3 Návrh a simulace antény.....	12
3.1 Návrh a výpočty.....	12
3.2 Simulace a optimalizace modelu kolineární antény	15
4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény	23
4.1 Realizace antény	23
4.2 Ověření vlastností antény	29
4.2.1 Měření rozptylového parametru S_{11}	29
4.2.2 Měření zisku antény substituční metodou.....	31
Závěr	33
Použitá literatura.....	34
Seznam příloh.....	I

Úvod

V současné době se velmi rychlým tempem rozvíjí nové technologie související s IoT (Internet of Things) neboli internetem věcí. Pro tuto bezdrátovou technologii, kdy dochází ke komunikaci mezi různými druhy zařízení je klíčové zabezpečit dostatečně spolehlivý způsob přenosu informací a s tím související kvalitní příjem signálu. Toho docílíme vybavením přijímače všesměrovou anténou s co nejlepším ziskem. Do této kategorie bezesporu patří kolineární antény, které se vyznačují vysokým ziskem. Tato bakalářská práce se věnuje návrhu a realizaci všesměrové kolineární antény pracující v pásmu 868 MHz.

Kmitočtové pásmo 868 MHz, je bez licenční rádiové pásmo ISM (industrial, scientific and medical), v současné době využívané především bezdrátovými technologiemi LoRa, Sigfox, v posledních letech čím dál více ke komerčním účelům.

Pro objasnění základních principů a vlastností antény je zapotřebí definovat pojmy, které se všeobecně týkají antén, jejich napájení a obecné dělení antén. Této problematice je věnována první kapitola práce.

V další části kapitoly se čtenář seznámí s elementárními pojmy z oblasti problematiky antén, jako jsou například jejich vstupní impedance, účinnost či zisk.

Druhá kapitola je věnována kolineárním anténám. Od vynálezu první takto označované antény až po různé varianty a koncepce jejich sestavení novodobých dnů.

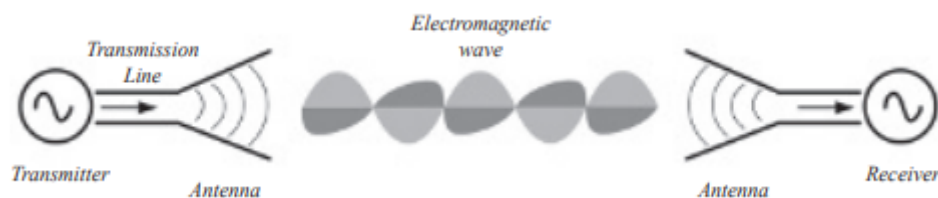
Na základě výsledků a poznatků převzatých z teorie je třetí kapitola celá věnována návrhu antény pro daný kmitočet, což znamená navržení a simulaci v příslušném softwaru.

Poslední kapitola je zaměřena na samotnou konstrukci a ověření správnosti antény. Postup realizace je zde doložen i fotografiemi. Do této kapitoly začleňujeme také dokumentaci.

1 Anténa a její základní vlastnosti

První kapitola je věnována základním pojmům z oblasti antén a jejich dělení. Součástí kapitoly jsou parametry antén, které budou využity při samotném návrhu a realizaci antény.

Anténa je zařízení, která transformuje elektromagnetické vlnění, šířící se podél vedení na elektromagnetické vlnění, šířící se ve volném prostoru a naopak. Proto je anténa nejdůležitější částí radiokomunikačního zařízení a nelze ji nahradit žádným jiným elektronickým obvodem. Během rádiového provozu, jak je vidět na obrázku 1. 1., se mezi vysílací a přijímací anténou prostřednictvím éteru uskutečňuje bezdrátové spojení, při kterém dvakrát dochází k uvedené transformaci vysokofrekvenční energie. Anténa se navrhuje tak, aby přeměna proběhla s co nejmenší, teoreticky žádnou, ztrátou. Anténa musí být naladěna na určitou frekvenci, což se provádí změnou rozměrů a konfigurace. Anténa je pasivní zařízení a funguje oběma směry – může být zapojena jako přijímací i jako vysílací tzv. reciprocita.[1][2]



Obrázek 1.1: Příklad rádiového přenosu [3]

Napájení antén je vysoko frekvenční (dále jen vf) vedení použité pro přenos vf výkonu od vysílače k anténě nebo od antény k přijímači. V současné době se jako napáječe obvykle používají koaxiální kabely s impedancí $50\ \Omega$ a $75\ \Omega$. Všudypřítomné koaxiální kabely vytlačily souměrné vodiče a dvojdrátová venkovní vedení. Základní výhodou koaxiálních kabelů je kompaktní konstrukce, která nevyzařuje vf energii. Pro vyšší kmitočtová pásma se doporučuje používat nízko útlumové napájecí kabely větších průměrů.[1][4]

1.1 Dělení antén

Antény lze dělit podle různých kritérií:

Podle způsobu použití:

- stacionární antény
- mobilní antény
- přenosné antény

Podle konstrukce:

- drátové
- trubkové
- plošné nebo prostorové

Podle vyzařovací charakteristiky:

- všesměrové
- směrové

Všechny antény jsou pak charakterizovány pracovním kmitočtovým pásmem. Jak bylo již uvedeno, délka antény musí odpovídat příslušné vlnové délce a ta je nepřímo úměrná frekvenci.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m] \quad (1.1)$$

λ vlnová délka

c rychlost světla ve vakuu

f frekvence

Neznáme zatím skutečnou anténu, která by mohla pracovat v celém kmitočtovém pásmu rádiových vln. Kmitočtové pásmo též jednoznačně určuje, které typy antén lze v tom, kterém pásmu z konstrukčního hlediska realizovat.[1]

1.2 Parametry antén

1.2.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance antény je definována jako impedance antény na jejích napájecích svorkách, tedy jako poměr napětí a proudu na těchto svorkách:

$$Z_{vst} = \frac{U_{vst}}{I_{vst}} = R_{vst} + jX_{vst} \quad [\Omega] \quad (1.2)$$

Kde U_{vst} vstupní napětí

I_{vst} vstupní proud

R_{vst} vstupní činný odpor

X_{vst} vstupní reaktance antény

1 Anténa a její základní vlastnosti

Vstupní činný odpor

$$R_{vst} = R_{vyz} + R_{ztr} [\Omega] \quad (1.3)$$

R_{vyz} vyzařovací odpor je daný typem antény a její výškou nad zemí

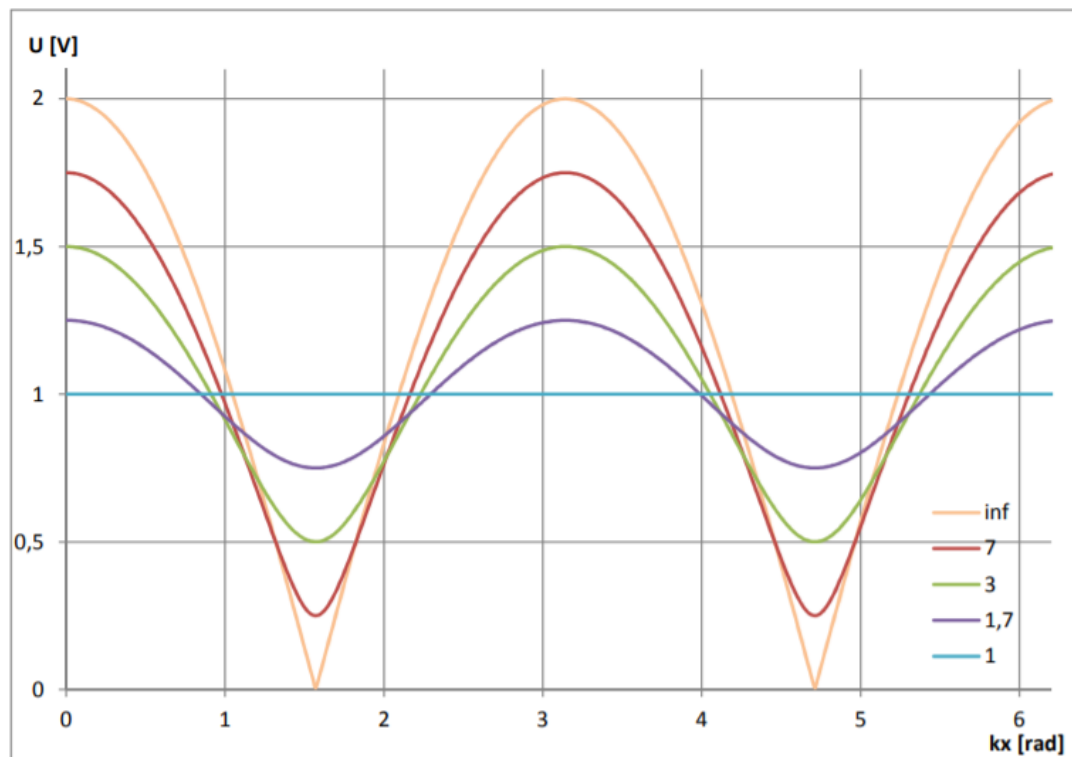
R_{ztr} ztrátový odpor antény je dán vlastní vodivostí materiálu, ze kterého je anténa vyrobena.[5][6][7]

Znalost impedance antény je důležitá pro její přizpůsobení k napájecí a vysílači. V praxi je zavedena výstupní impedance 50 Ω . Mají-li výstup, vysílače, napáječ a anténa stejnou impedanci, je výkon vysílače optimálně anténou vyzářen. V takovém případě nezáleží na délce napáječe, koaxiálního kabelu o impedanci 50 Ω . Jeho délka může být libovolná, protože nemá vliv na parametry impedance přizpůsobené antény.[1]

1.2.2 Poměr stojatých vln

Poměr stojatých vln PSV (angl. SWR – standing wave ratio) je skalární veličina. Při odrazu na rozhraní mezi vedením o impedanci Z_0 a zátěží s impedancí Z_k vzniká odražená vlna U^- , která se v každém bodě sčítá s vlnou postupnou U^+ . Tam, kde se obě vlny sčítají ve fázi, vzniká maximum stojaté vlny U_{max} a tam, kde se vlny sčítají v proti fázi, vzniká minimum stojaté vlny U_{min} . Stojaté vlny jsou kvalifikovány skalárním parametrem PSV (VSWR – voltage standing wave ratio).[8]

$$PSV = \frac{U_{max}}{U_{min}} \quad (1.4)$$



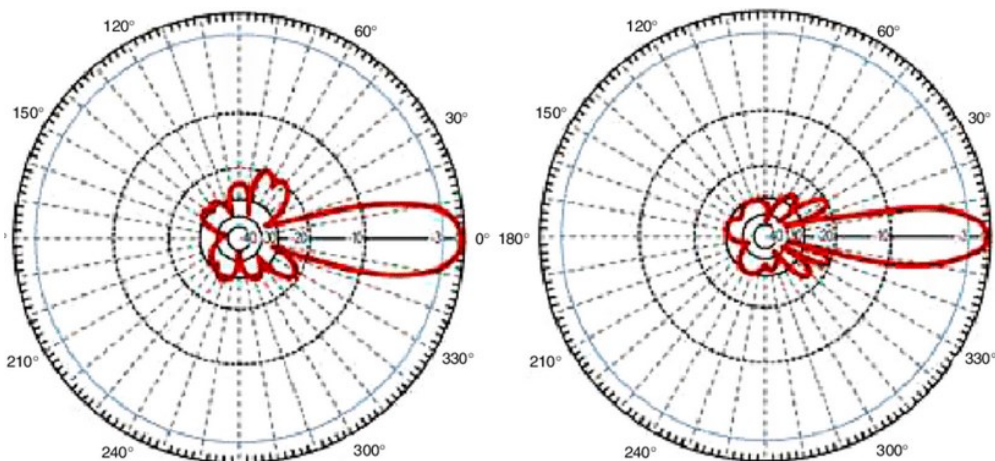
Obrázek 1.2: Stojatá vlna na vedení pro různé PSV [8]

1.2.3 Směrnost antény

Je to vlastnost antény nebo anténní soustavy vysílat či přijímat elektromagnetické vlny s různou intenzitou v závislosti na směru. Směrnost antény popisuje prostorový diagram antény. Dle prostorového diagramu antény rozlišujeme dva typy směrnosti antén:

- Směrové antény

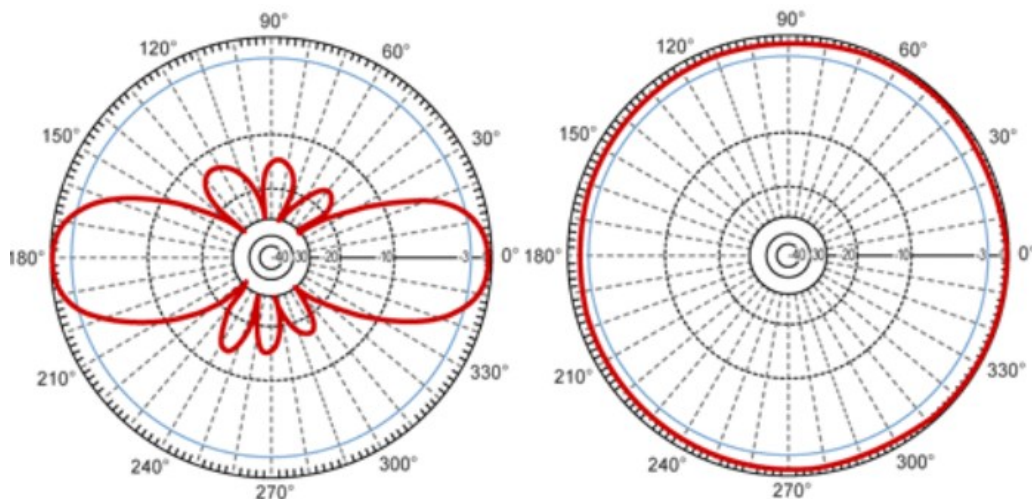
Diagram záření antény má silně vyjádřené maximum.



Obrázek 1.3: Diagram směrové antény [9]

- Všesměrové antény

Diagram záření antény má přibližně kruhový tvar, alespoň v jedné rovině. [4]



Obrázek 1.4: Diagram všesměrové antény [10]

1.2.4 Účinnost antény

Účinnost antény vyjadřuje poměr celkově vyzářeného výkonu P_{vyz} k výkonu dodaného na vstup antény s připojeného zdroje P_{vst}

$$\eta = \frac{P_{vyz}}{P_{vst}} [\%] \quad (1.5)$$

η označuje bezrozměrnou celkovou účinnost antény.

Celková účinnost v sobě zahrnuje ztráty na vstupu a uvnitř anténní struktury. Celkovou účinnost ovlivňují objekty ležící v blízkém poli antény, ovlivňují rozložení proudu a napětí, absorbují část výkonu.[4][6]

1.2.5 Zisk antény

Hlavním parametrem charakterizujícím účinnost antény je její zisk G . Jedná se o relativní hodnotu, vztaženou k určité anténě referenční. Zisk antény v dB je dán logaritmem poměru napětí (U_1/U_0) nebo výkonu (P_1/P_0) na zátěži, připojené jednak k měřené anténě a poté k anténě referenční.[1]

$$G = 20 \log \frac{U_1}{U_0} = 10 \log \frac{P_1}{P_0} [dB] \quad (1.6)$$

U_1 napětí na zátěži měřené antény

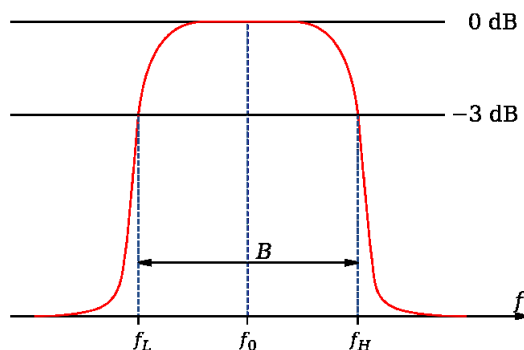
U_0 napětí na zátěži referenční antény

P_1 výkon zátěži měřené antény

P_0 výkon na zátěži referenční antény

1.2.6 Šířka pásma

Protože různé základní charakteristiky antén se mění různým způsobem v závislosti na frekvenci, neexistuje jednotný předpis, který by definoval šířku pásma (bandwidth). Obecně se jedná o rozsah frekvencí, uvnitř kterého se anténa chová vzhledem ke specifikované charakteristické veličině standartním způsobem. Nejčastěji se jako šířka pásma uvádí rozsah kmitočtů, ve kterém zisk antény poklesne o -3 dB oproti nejvyšší hodnotě, jak lze vidět na obrázku 1.5 níže.[6]



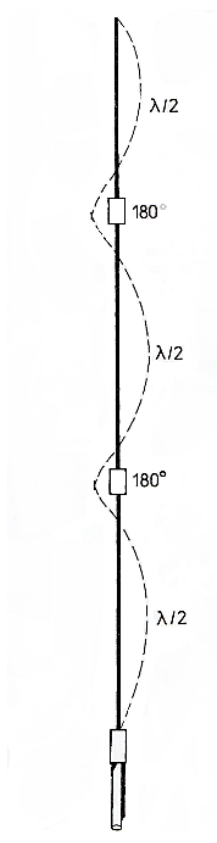
Obrázek 1.5: Ukázka šířky pásma [11]

2 Kolineární anténa

Druhá kapitola je věnována popisu a rozdělení kolineárních antén. Popisu konstrukce, vynálezu první kolineární antény a představení jejich různých variací. Hledání informací kolem kolineárních antén se ukázalo jako velmi problematické, z důvodu absence jakýchkoliv souhrnných a podrobnějších zdrojů z dané problematiky.

2.1 Princip a konstrukce

Kolineární anténa, též také kolineární soustava dipólů, je přímková anténní řada s příčným vyzařováním, jejíž prvky řady jsou tvořeny dipóly souose uspořádaných v ose přímkové řady. V bodech styku dipólů je zajištěno otočení fáze v proudů o 180° , aby byl celek soufázový, celou sestavu napájí společný napáječ s kolmou orientací. Optimální vzdálenost mezi středy dipólů je $0,75 - 0,90 \lambda$. Zisk kolineární antény je dán počtem prvků v řadě.[4][12]



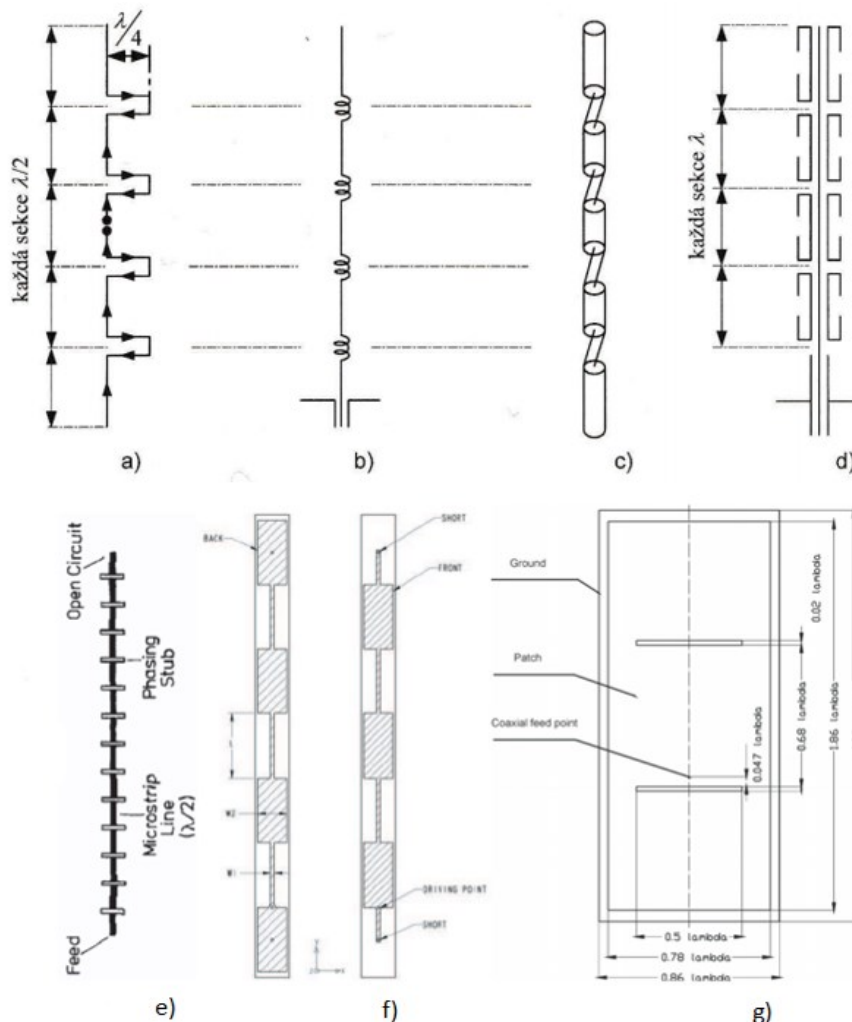
Obrázek 2.1: Kolineární anténa [1]

2 Kolineární anténa

Vynálezcem první kolineární antény byl britský rádiový průkopník Charles S. Franklin, který ji představil roku 1924. Originální návrh antény spočíval v dlouhém drátu, který obsahoval úseky tvaru U délky $\frac{\lambda}{4}$ zajišťující otočení fáze a napájení rovných úseků délky $\frac{\lambda}{2}$. [12][13]

2.2 Varianty kolineární antény

Principu obrácení fáze lze u kolineárních antén dosáhnout hned několika různými způsoby. Uspořádání přímé vertikální řady s příčným vyzařováním, jak lze vidět na obrázku 2.2 a). Uspořádání podle obrázku b) používá induktivní prvky s cílem obrátit fázi, zatímco řešení podle obrázku c) a d) užívá k tomu účelu sekce koaxiálního vedení. Uvedená uspořádání je možné montovat do sklolaminátových trubic, které současně tvoří nosnou konstrukci. Na vstupu antény je třeba obvykle instalovat impedanční přizpůsobovací vedení, které transformuje impedanci antény na vlnovou impedanci napájecího kabelu.



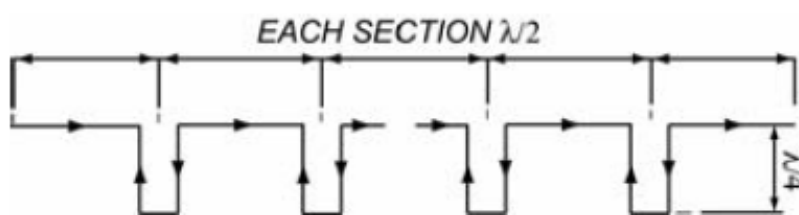
Obrázek 2.2: Varianty kolineární antény [4][13] upraveno

2 Kolineární anténa

Na obrázku d) jsou zřetelně uspořádány koaxiální tlumivky s vysokou impedancí, které omezují protékání vf proudů na napájecí vedení. Principu obrácení fáze lze také využít u technologie mikro páskových antén obrázků e), f) a g).[4][13]

2.2.1 Franklinova anténa

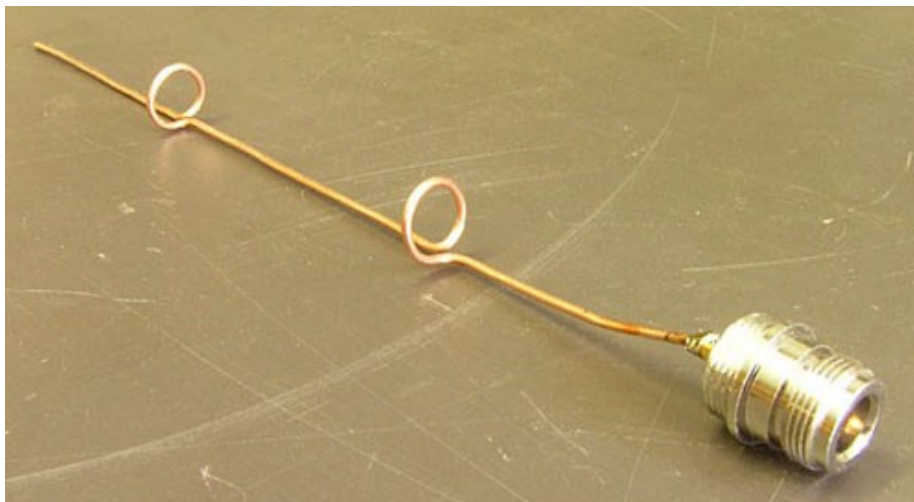
Franklinova anténa je soustava sériově zapojených půl vlnných dipólů tzv. kolineární řada dipólů, jejichž propojení je tvořeno buď indukčností, nebo čtvrt vlnnými pahýly. Toto propojení zajišťuje soufázové napájení všech dipólů, což je charakteristické pro anténní řadu s příčným zářením s ostře vyjádřeným maximem diagramu záření v rovině kolmé k ose řady. Vertikální Franklinova anténa se někdy též nazývá Franklinova-Marconiho.



Obrázek 2.3: Franklinova anténa s pahýlovým vedením [12]

2.2.2 Drátová kolineární anténa

Drátová kolineární anténa je celá vyrobena z jednoho kusu měděného drátu, kde jsou od sebe jednotlivé úseky odděleny či navázány závitem drátu.[14]

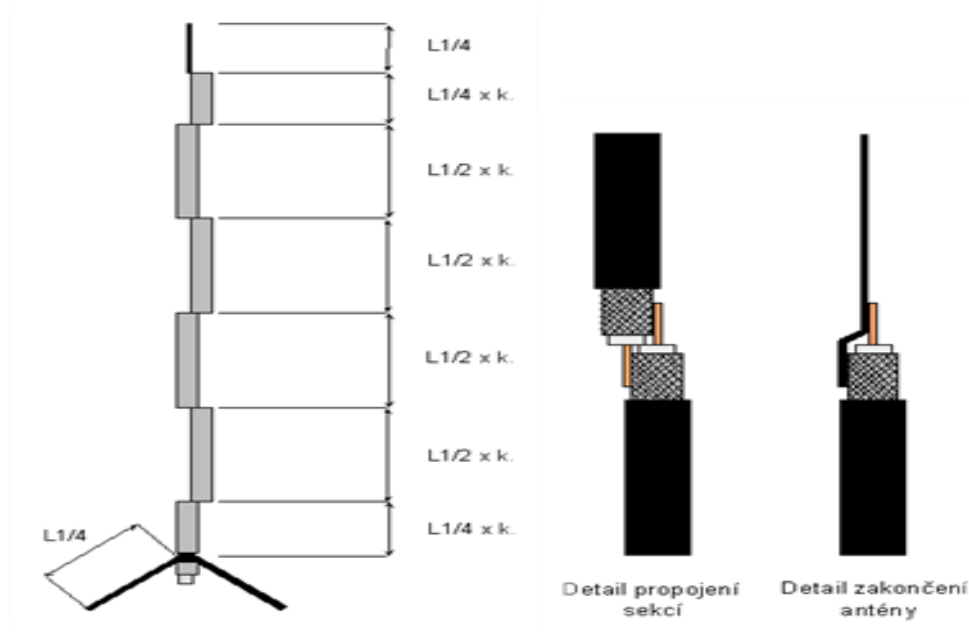


Obrázek 2.4: Ukázka drátové kolineární antény [14]

2 Kolineární anténa

2.2.3 Koaxiální kolineární anténa

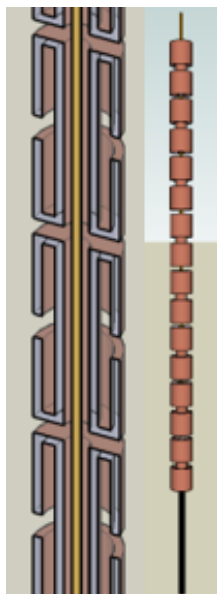
Tento typ antény je složen z dipólů umístěných nad sebou souose, v bodech styku dipólů je zajištěno otočení fáze vůči proudu o 180° , aby byl celek soufázový. Skládá se z několika půlvlnných úseků koaxiálního kabelu, které tvoří zářič antény. Ten je nahoře zakončen čtvrtvlnným úsekem, na nějž navazuje drát čtvrtvlnné délky. Dole je zářič zakončen také čtvrtvlnným úsekem, na nějž navazují radiály délky čtvrtvlnny, sklopené o 45° dolů. Ty jsou vodivě spojené s opletením posledního koaxiálního úseku. Důležitým parametrem je v tomto případě činitel zkrácení (k). Při konstrukci dbáme, aby nedošlo k propletení sousedních úseků. Na detailním obrázku 2.5 níže, jsou vyobrazeny propojení jednotlivých sekcí a zakončení antény.[15]



Obrázek 2.5: Detail propojení jednotlivých sekcí [15]

2.2.4 Hrníčková kolineární anténa

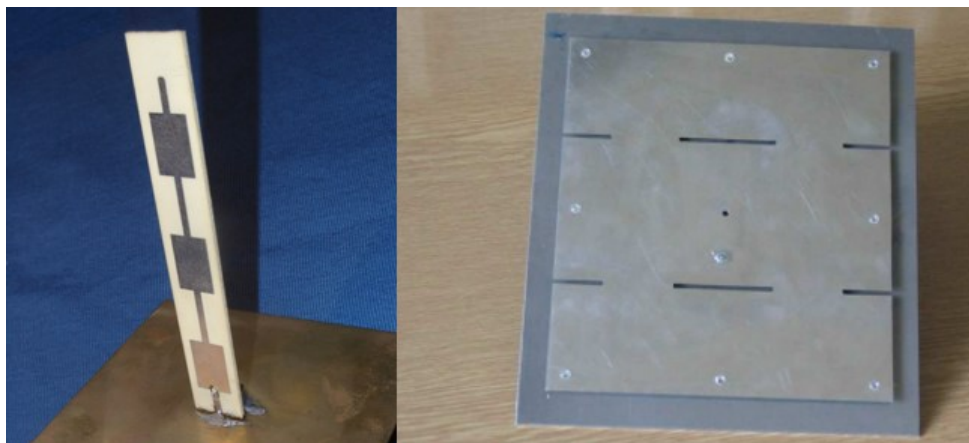
Dalším typem kolineární antény je tzv. hrníčková konstrukce. Můžeme si jej představit jako půlvlnný skládaný dipól, který extrudujete kolem delší osy. Vznikne "dvojhrnek", jehož středem lze ještě protáhnout napájecí vodič. Dvojhrnky se dají řetězit do patrové kombinace. Možné sestavení na obrázku 2.6.[16]



Obrázek 2.6: Hrníčková kolineární anténa [16] upraveno

2.2.5 Kolineární mikropásková anténa

Je tvořena kovovým páskovým vodičem upevněným na jedné straně tenké dielektrické desky, jejíž opačná strana je tvořena kovovou protiváhou. Anténní prvek má charakter „fličku“ (angl. patch) z mědi nebo zlata vytvořeného na dielektrické desce fotochemickou technologií. Hlavní výhodou mikropáskových antén je nízká váha, malý objem, převážně plošný rozměr s možností přizpůsobení k povrchu nosiče antény jako například letoun či raketa. Nejčastěji používaná mikropásková anténa má tvar pravoúhlého fličku, napájeného buď koaxiální sondou, mikropáskovým vedením, případně přechodem z vlnovodu.[4]



Obrázek 2.7: Kolineární mikropásková a patch anténa [17][18]

Za zmínku stojí i kolineární anténní řady, které využívají principu kolineárnosti. Jsou tvořeny uspořádáním antén paralelně a kolineárně podél společné linie nebo osy. Používají se jako antény pro základnové stanice pozemních mobilních rádiových systémů.[1]

3 Návrh a simulace antény

V této kapitole je popsán návrh antény pro kmitočtové pásmo 868 MHz, výpočet rozměrů a vytvoření modelu samotné antény v programu CST Studio Suite, včetně simulace jejích vlastností.

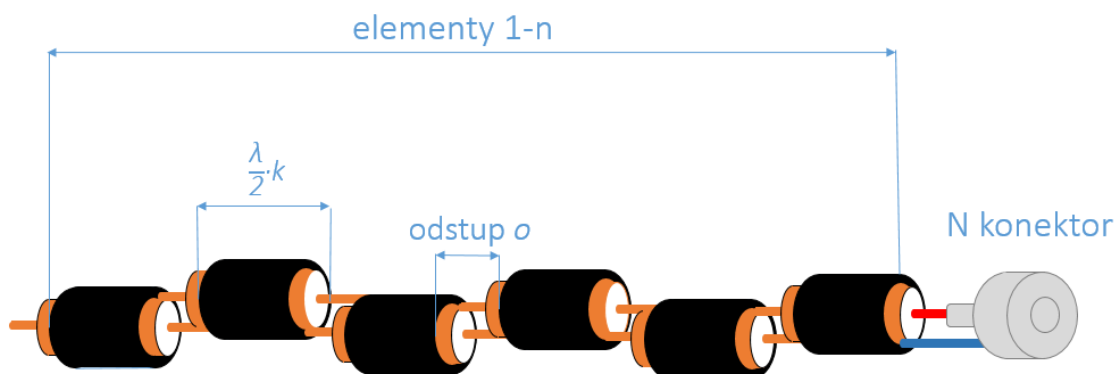
3.1 Návrh a výpočty

Vzhledem k možnostem a praktičnosti se pro konstrukci antény rozhodovalo mezi dvěma možnými způsoby realizace, a sice koaxiální a drátovou variantou kolineární antény. Jelikož je při konstrukci vyžadována co největší přesnost, byla vybrána koaxiální varianta, kdy zastřihnutí kabelu lze považovat za přesnější oproti metodě ohybu drátu.

Variant koaxiální kolineární antény lze dohledat nepřeberné množství a je skoro nemožná nalézt alespoň dva zdroje, které se shodují na určitém typu designu. Společný základ ovšem můžeme nalézt v půlvlnných segmentech, jejichž délka je upravena na požadovanou vlnovou délku.

Možné varianty koaxiální antény:

- Zakončení horní části:
 - Čtvrtvlnný segment s čtvrtvlnným vodičem
 - Zakončeno $50\ \Omega$ rezistorem
 - Půlvlnný segment
- Zakončení spodní části:
 - Čtvrtvlnným segmentem
 - Konektorem
 - Feritovým jádrem
 - Balunem
 - Rukávem



Obrázek 3.1: Návrh koaxiální kolineární antény

3 Návrh a simulace antény

Nejprve je nutné určit střední kmitočet pro pracovní kmitočtové pásmo 868 MHz. Z všeobecných oprávnění k využívání rádiových kmitočtů českého telekomunikačního úřadu č. VO-R/10/12.2019-9 lze vyčíst rozsah 863–870 MHz pro kmitočtové pásmo 868 MHz, středová frekvence se tedy rovná 866,5 MHz.

Výpočet rozměrů je závislý na provozovaném kmitočtu. Prvním a nejdůležitějším rozměrem pro tvorbu antény je její vlnová délka, kterou vypočítáme z poměru rychlosti světla vůči středové frekvenci.

$$\lambda = \frac{c}{f} [m] \quad (3.1)$$

λ vlnová délka

c rychlost světla

f frekvence

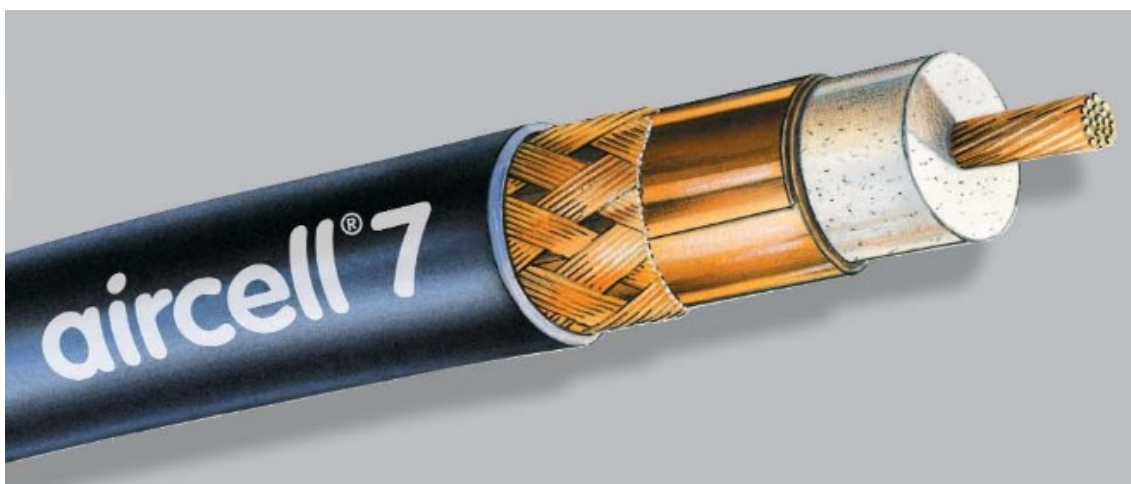
Po dosazení:

$$\frac{300 \cdot 10^6}{866,5 \cdot 10^6} = 346 \text{ mm}$$

Pro návrh je potřeba ještě délka půlvlnného dipólu, tedy

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{346}{2} = 173 \text{ mm}$$

Pro určení délky jednotlivých segmentů l je kromě vlnové délky ještě potřeba znát hodnotu činitele krácení k , kterého získáme dle typu použitého koaxiálního kabelu. Pro realizaci antény byl vybrán kvalitní, nízko ztrátový koaxiální kabel AIRCELL 7.



Obrázek 3.2: Detail koaxiálního kabelu AIRCELL 7

3 Návrh a simulace antény

Z technických dat pro AIRCELL 7 lze vyčíst hodnotu činitele krácení $k = 0,83$, která je násobena velikostí již vypočítaného půlvlnného dipólu a získáme výslednou velikost jednoho segmentu

$$l = \frac{\lambda}{2} \cdot k = \frac{346}{2} \cdot 0,83 = 143,59 \text{ mm.}$$

Dále lze vyčíst hodnoty průměrů jednotlivých vrstev koaxiálního kabelu. Odstup jednotlivých segmentů o zvolen 3 mm.

Aby byla anténa použitelná ve venkovním prostředí, je třeba ji umístit do správného obalu. Obalem se rozumí kryt, který by měl být trubcového tvaru, odpovídajícího průměru a odolný vůči povětrnostním vlivům včetně UV záření. Všechny tyto vlastnosti splňuje trubka od výrobce FRAENKISCHE, která je z UV odolného PVC. Uchycení ke stožáru bude realizováno stahovacími pásky, které jsou rovněž UV odolné. Jako spodní a vrchní zátka bude použita klasická vodovodní záslepka neboli koncovka.

V následující tabulce lze nalézt souhrn všech zatím vypočítaných a vyčtených hodnot.

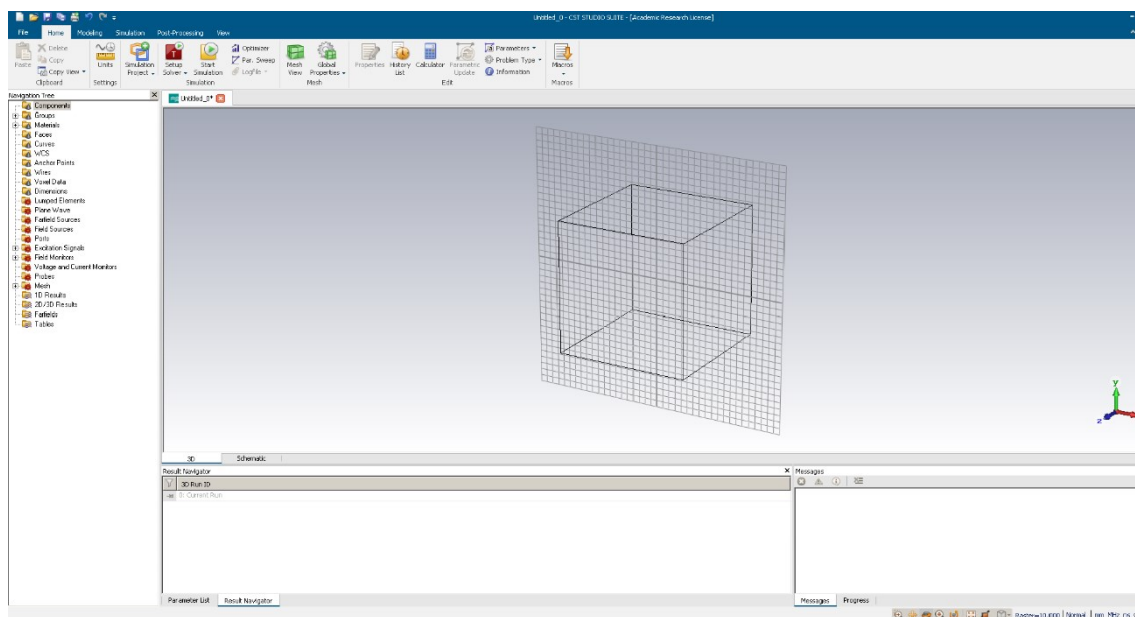
Tabulka 3.1: Souhrn hodnot

symbol	popis	hodnota
λ	délka vlny	346 mm
$\lambda/2$	délka půlvlnny	173 mm
k	činitel krácení	0,83
l	délka segmentu	143,59 mm
o	odstup segmentů	3 mm
a	průměr vodiče	1,85 mm
b	průměr dielektrika	5,0 mm
c	průměr stínění	5,75 mm
d	průměr PVC obalu	7,3 mm
r	délka přesahu vodiče	8 mm

3 Návrh a simulace antény

3.2 Simulace a optimalizace modelu kolineární antény

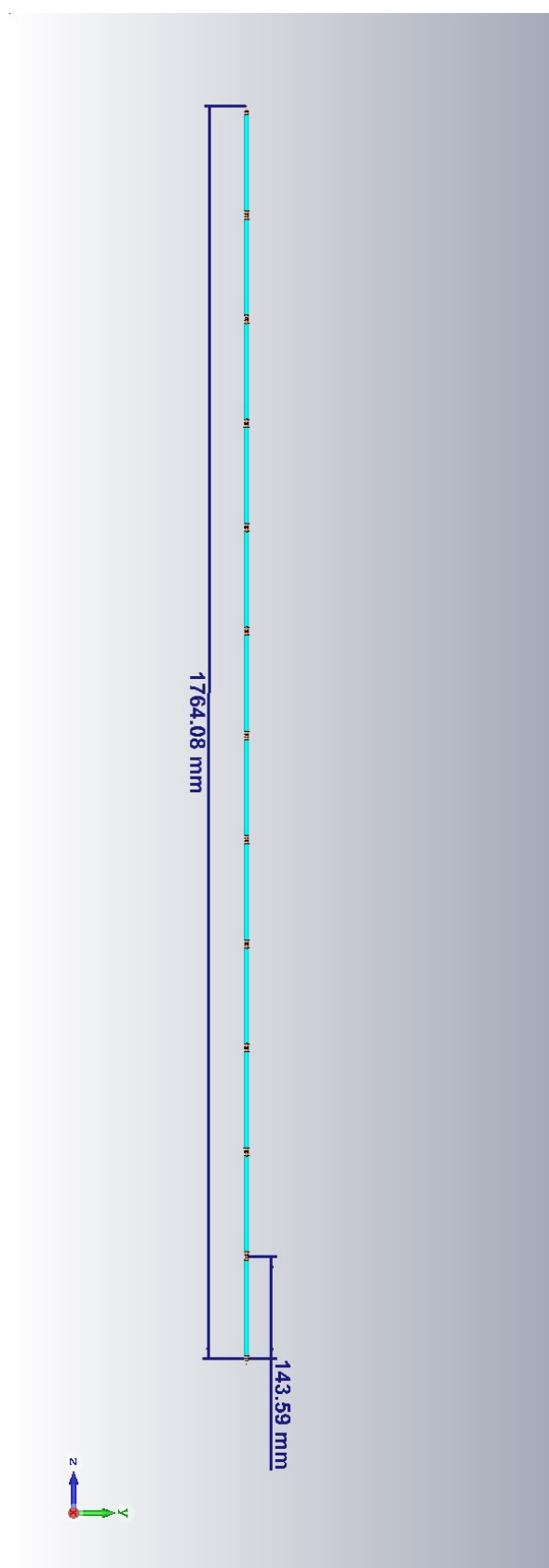
Následujícím krokem je vytvoření modelu antény dle návrhu s pomocí již známých parametrů v programu CST (Computer Simulation Technology) Studio Suite. CST je velmi výkonný softwarový balík určený pro návrhy, analýzy a optimalizaci EM (elektromagnetických) komponentů a systému. Ovládání programu je velice intuitivní, velmi snadno a rychle se s ním seznámí i úplný začátečník.



Obrázek 3.3: Pracovní prostředí programu CST

Celý model antény vychází z jednoho elementu koaxiálního kabelu délky l , který byl pomocí vhodně zvolené funkce Transform – translate nakopírován ve vzdálenostech násobku součtu délky elementů l a odstupu o .

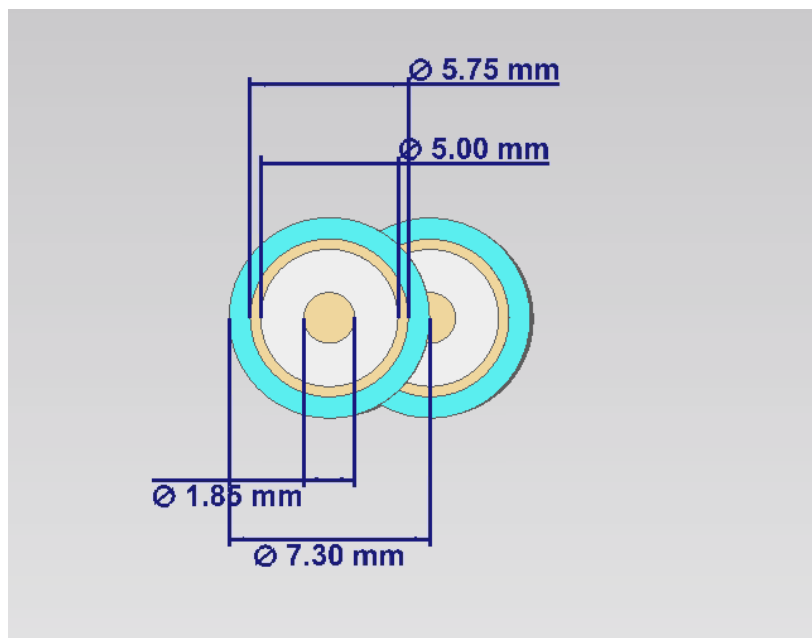
3 Návrh a simulace antény



Obrázek 3.4: Vytvořený model v programu CST Studio

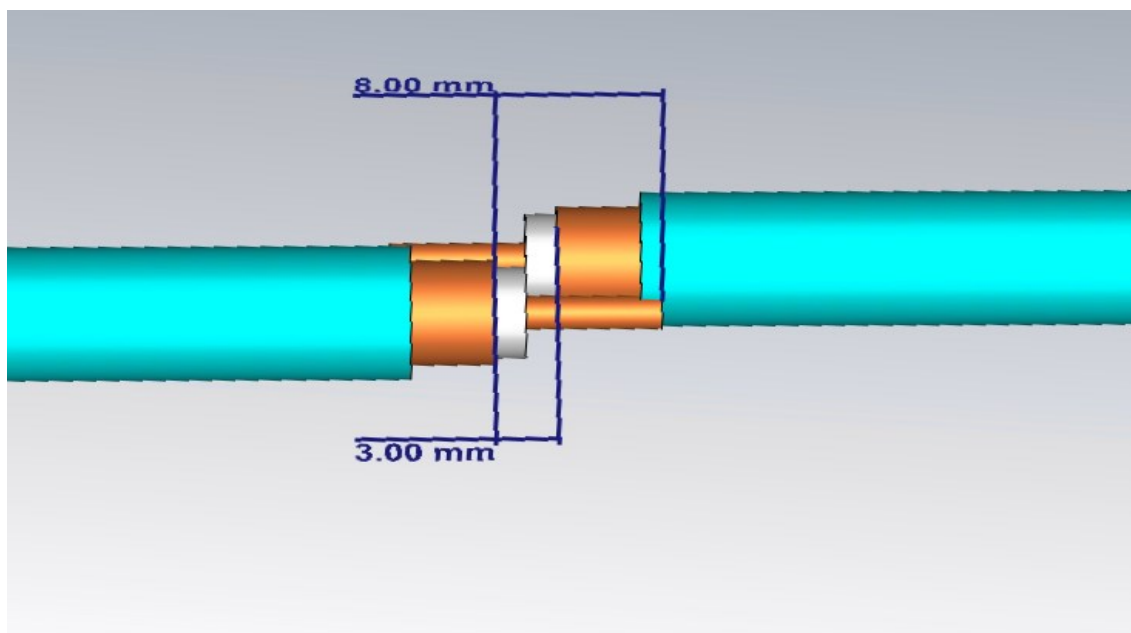
3 Návrh a simulace antény

Druhým vytvořeným prvkem byl vyosený element, totožný s prvním vytvořeným, ovšem posunutým počátkem v ose x o parametr celkového průměru koaxiálního kabelu r . Detail průměrů koaxiálního kabelu a jeho vyosení lze vidět na obrázku 3.5. Vyosený element byl následně nakopírován do vzniklých prostor mezi první elementy.



Obrázek 3.5: Detail koaxiálního kabelu

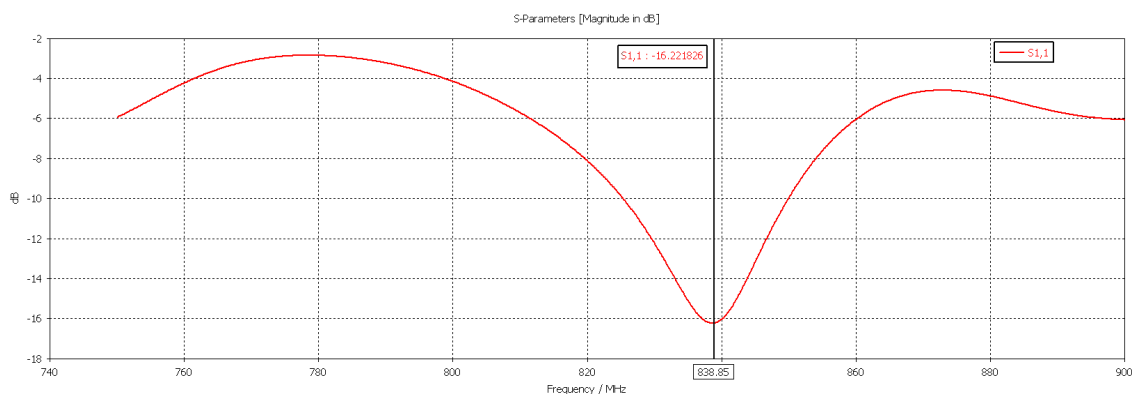
Jak lze vidět na obrázku 3.6 pro usnadnění výroby antény, byl odstup o mezi jednotlivými elementy realizován protažením izolačních vrstev o délku poloviny o .



Obrázek 3.6: Detail odstupu elementů

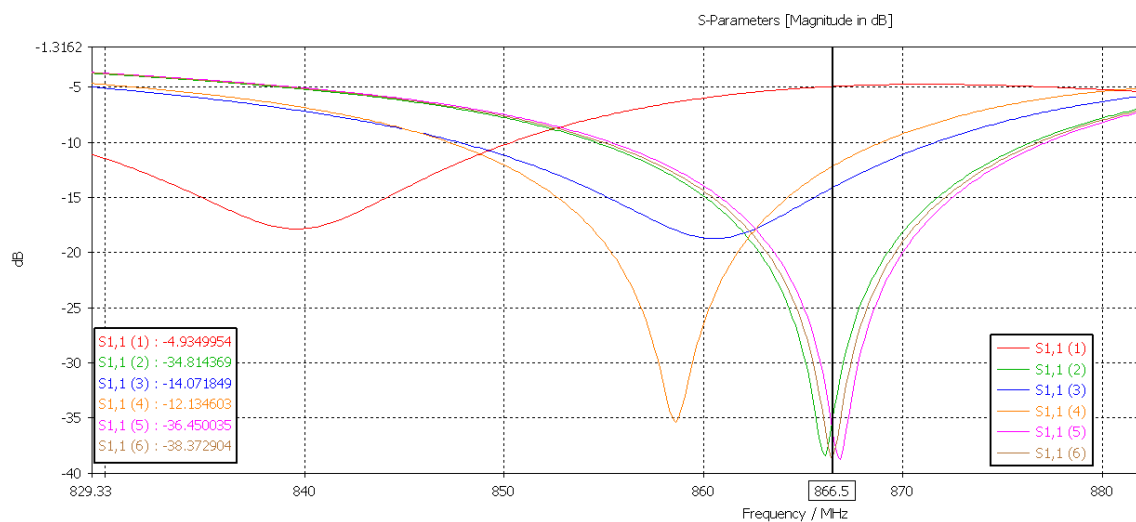
3 Návrh a simulace antény

Po vytvoření modelu se mohlo přejít k simulaci přizpůsobení antény S_{11} . V prvé řadě bylo nutné k modelu přidat napájecí port o impedanci $50\ \Omega$ a následně provést vlastní výpočet simulace přizpůsobení pomocí zvoleného algoritmu TDS (Time Domain Solver). Z prvního výsledku dle obrázku 3.7 níže, lze vidět, že přizpůsobení antény S_{11} nabývá hodnoty 838,85 MHz místo požadovaných 866,5 MHz. Anténa tedy není přizpůsobená pro frekvenční pásmo 868 MHz a je potřeba přejít k optimalizaci jejích parametrů. Pro optimalizaci byly použity parametry l délka segmentu a odstup o jednotlivých segmentů. Ostatní parametry jako průměry jednotlivých vrstev koaxiálního kabelu jsou pevně dány.



Obrázek 3.7: Frekvenční závislost parametru S_{11} před optimalizací

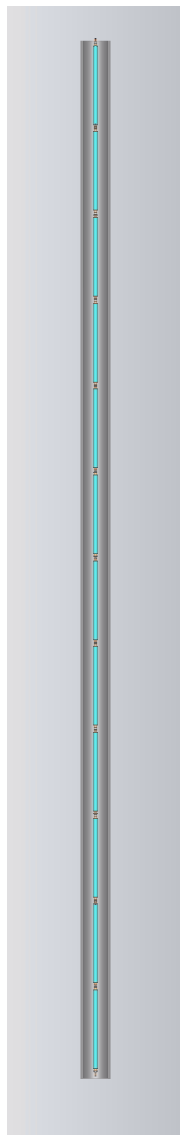
Po optimalizaci parametrů l a o , lze na obrázku 3.8 vidět, že anténa dosahuje na frekvenci 866,5 MHz hodnoty -38 dB a je tedy přizpůsobená i použitelná.



Obrázek 3.8: Frekvenční závislost parametru S_{11} po optimalizaci

3 Návrh a simulace antény

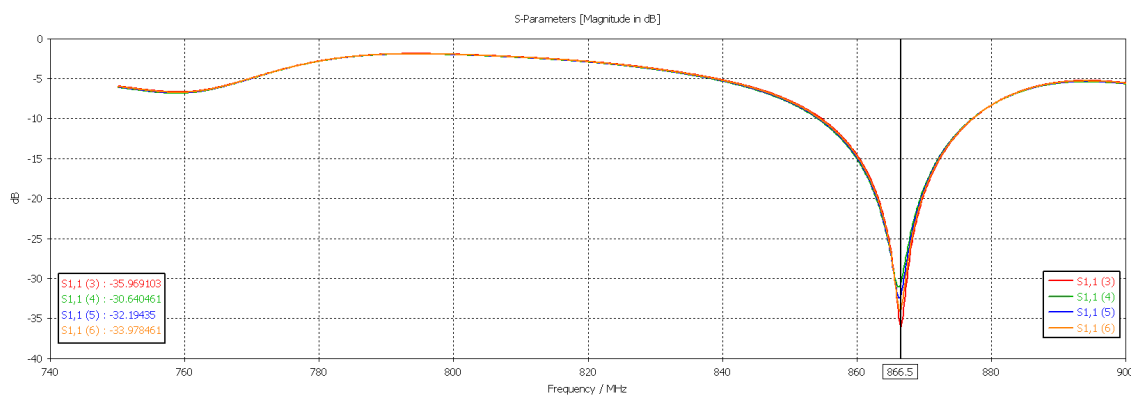
Následujícím krokem je přimodelování krytu, ve kterém bude anténa chráněna proti vnějším vlivům. Jelikož výrobce neuvádí hodnotu permitivity prostředí ϵ_r , jež se pro PVC pohybuje v rozmezí 3,4 až 4, je třeba využít funkci Parametr Sweep, díky které získáme přehled, jak rozdílné hodnoty permitivity ovlivní vlastnosti antény.



Obrázek 3.9: Anténa s krytem

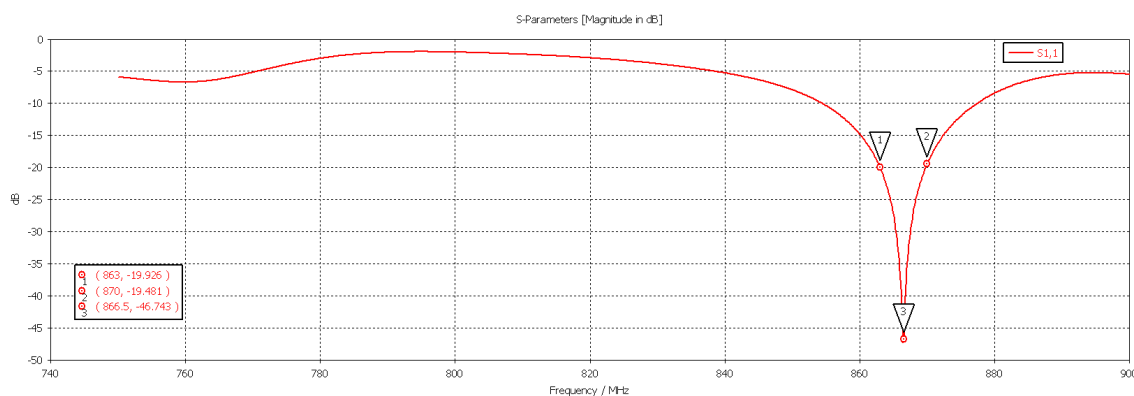
3 Návrh a simulace antény

Po provedení série výpočtů, jak lze vidět na obrázku 3.10, lze vyčíst, že žádná z hodnot permitivity v rozmezí 3,4 až 4 zásadně neovlivňuje vlastnosti antény.

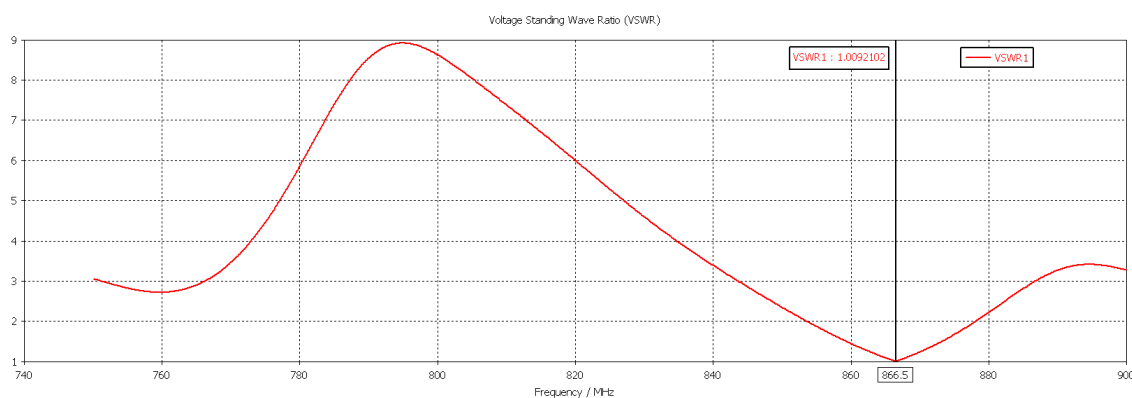


Obrázek 3.10: Funkce Parametr Sweep pro permitivitu prostředí ϵ_r

Po přimodelování krytu bylo zapotřebí anténu opět optimalizovat do její finální podoby. Jak lze vidět na obrázku 3.11 níže, model nyní pro parametr S_{11} nabývá hodnoty téměř -47 dB vůči požadované minimální hodnotě -10 dB, což se dá považovat za velice dobrý výsledek. Mezi další parametry, jež lze zobrazit patří poměr stojatých vln, který nabývá hodnoty 1,009. Splňuje tedy podmínku $VSWR < 2$.



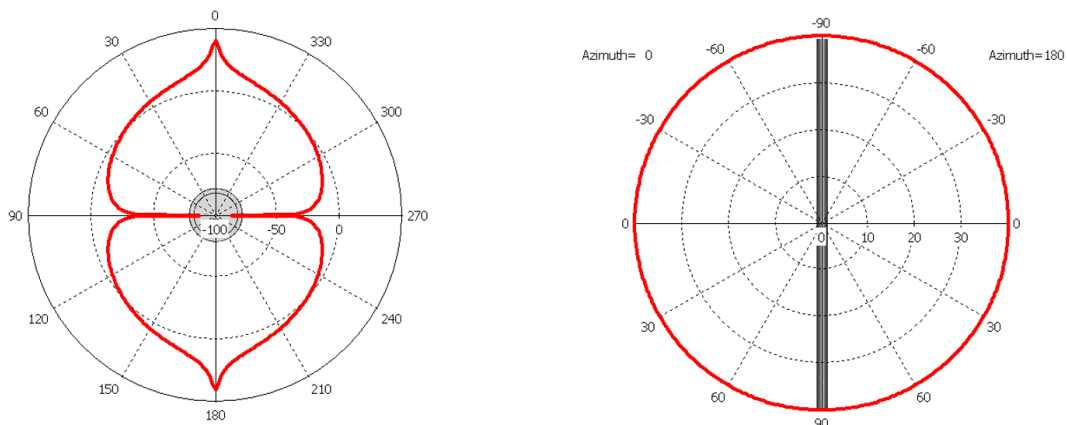
Obrázek 3.11: Výsledná hodnota frekvenční závislosti parametru S_{11}



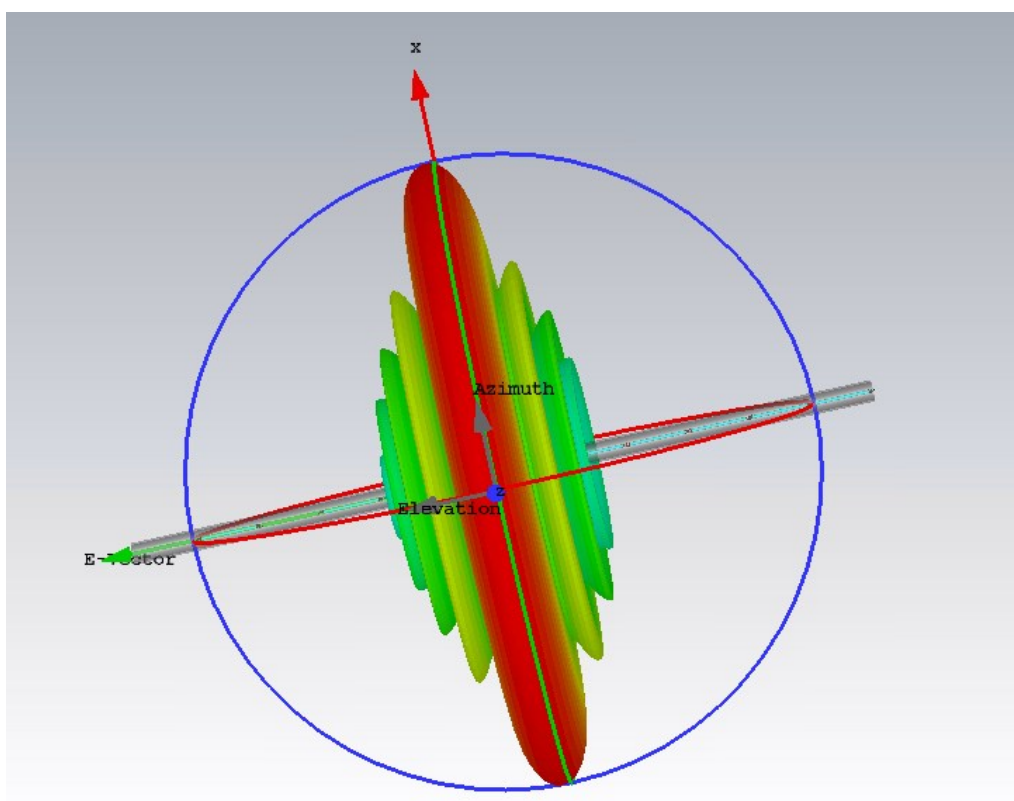
Obrázek 3.12: Výsledný poměr stojatých vln VSWR

3 Návrh a simulace antény

Dle vykreslení výsledné směrovosti antény programem CST, obrázky 3.13 a 3.14, jak 2D, tak 3D model odpovídají vlastnostem všesměrové antény.



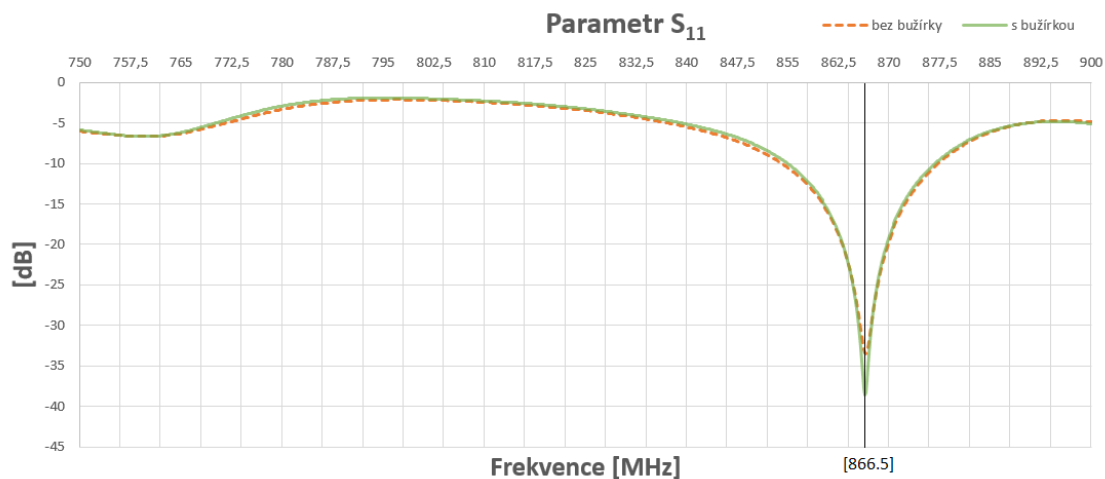
Obrázek 3.13: 2D model výsledné směrovosti antény



Obrázek 3.14: 3D model výsledné směrovosti antény

3 Návrh a simulace antény

V rámci simulace byl i paralelně vytvořen model a provedeno měření s cílem zjistit, jak PVC bužírka koaxiálního kabelu ovlivňuje vlastnosti antény. Při porovnání výsledků (obrázek 3.15), kdy bez bužírky dosahuje parametr S_{11} hodnoty -33,5 dB a s bužírkou naopak -38,37 dB, bylo rozhodnuto pro její zachování. Nejen díky rozdílu parametru S_{11} , ale také kvůli lepší manipulaci s anténou při výrobě, včetně její vyšší odolnosti vůči kroucení a ohybu.



Obrázek 3.15: Rozdíl hodnoty S_{11} v závislosti na přítomnosti PVC bužírky

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

Tato kapitola je zaměřena na samotnou realizaci antény ze získaných poznatků z předchozích kapitol a vlastní ověření vlastností a funkčnosti vytvořeného modelu.

4.1 Realizace antény

Nyní můžeme díky výpočtům, simulacím a získaným poznatkům přejít k samotné realizaci antény. Pro větší přehlednost je v následující tabulce 4. 1. zobrazen výčet parametrů důležitých pro konstrukci.

Tabulka 4.1: Parametry antény ke konstrukci

symbol	popis	hodnota
l	délka segmentu	138,78 mm
o	odstup segmentů	3,89 mm
r	délka přesahu vodiče	8 mm
s	délka segmentu s přesahem	154,78 mm
t	přesah dielektrika	1,945 mm

K sestavení antény bylo potřeba následujícího materiálu, nářadí a součástek:

- koaxiální kabel Aircell 7 v délce 2 m
- konektor N, female koncový
- PVC izolační páska
- stahovací SK pásy
- PVC – UV odolná trubka \varnothing 25 mm v délce 2 m
- trubkové záslepky (koncovky) \varnothing 25 mm
- tavná pistole
- kombinační kleště
- kleště
- zalamovací nůž
- pilka
- nástroj na odizolování koaxiálních kabelů
- elektrická pájecí pistole
- pájka s kalafunou a pájecí tuk
- vázací drát pozinkovaný \varnothing 1 mm
- svinovací metr
- posuvné měřítko

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

V prvním kroku bylo třeba naměřit a nastříhat koaxiální kabel na 12 elementů požadované délky s 154,78 mm. Počet elementů je kompromisem mezi celkovou délkou antény a optimálním ziskem. Celková délka antény nad 2 m je nepraktická, zároveň 8 a méně elementů nezajistí dostatečný zisk pro provoz antény. Následně bylo nutné z každého konce ve vzdálenosti přesahu p 8 mm odstranit stínění a zachovat izolační vrstvu v šířce t 1,945 mm. Dvě izolační vrstvy z na sebe navazujících elementů tvoří odstup o 3,89 mm. Pro usnadnění napojení elementů bylo na každém konci odhaleno stínění vykrojením bužírky.



Obrázek 4.1: Zhotovené elementy antény



Obrázek 4.2: Detail napojení elementů

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

Výše, na obrázku 4.1, lze vidět zhotovené elementy antény. Detail napojení vyosených elementů s realizovaným odstupem pomocí dielektrika je zobrazen na obrázku 4.2. Zachování PVC bužírky se ukázalo praktické i z hlediska zabránění třepení konců stínění. Po napojení byl spoj zafixován PVC páskou z důvodu větší odolnosti vůči manipulaci s anténou. Odhalené stínění elementu mělo tendence se při postavení antény do vertikální polohy srolovat a ovlivnit tak její vlastnosti. Po spojení všech dvanácti částí následovalo napojení N konektoru. Kvůli větší pevnosti spoje mezi stíněním s kostrou konektoru, byl použit návin vázacího drátu, jak lze vidět níže na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Napojení N female koncového konektoru

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

Dalším krokem při realizaci je uchycení konektoru do PVC koncovky. K tomuto účelu posloužila vrtačka pro vyvrtání odpovídajícího otvoru do koncovky a její následné zafixování tavnou pistolí a PVC páskou.

Takto zhotovenou anténu můžeme vložit do trubky a vyzkoušet první měření vlastností antény. K měření byl využit kabelový a anténní analyzátor ZVH4 od firmy Rohde&Schwarz. Z prvních výsledků, kdy anténa rezonuje na kmitočtu 871 MHz, lze usoudit, že při realizaci došlo k nepřesnostem v délkách parametrů způsobeným například stříháním kabelu, odizolováním dielektrika či v odlišné reálné hodnotě permitivity PVC trubky. Značný vliv má skutečnost, že anténa byla nasimulována v ideálním prostředí bez vnějších vlivů. Jelikož anténa rezonuje nad požadovanou frekvencí 866,5 MHz, je třeba ji doladit prodloužením posledního elementu. V opačném případě bychom přistoupili ke zkrácení elementu.

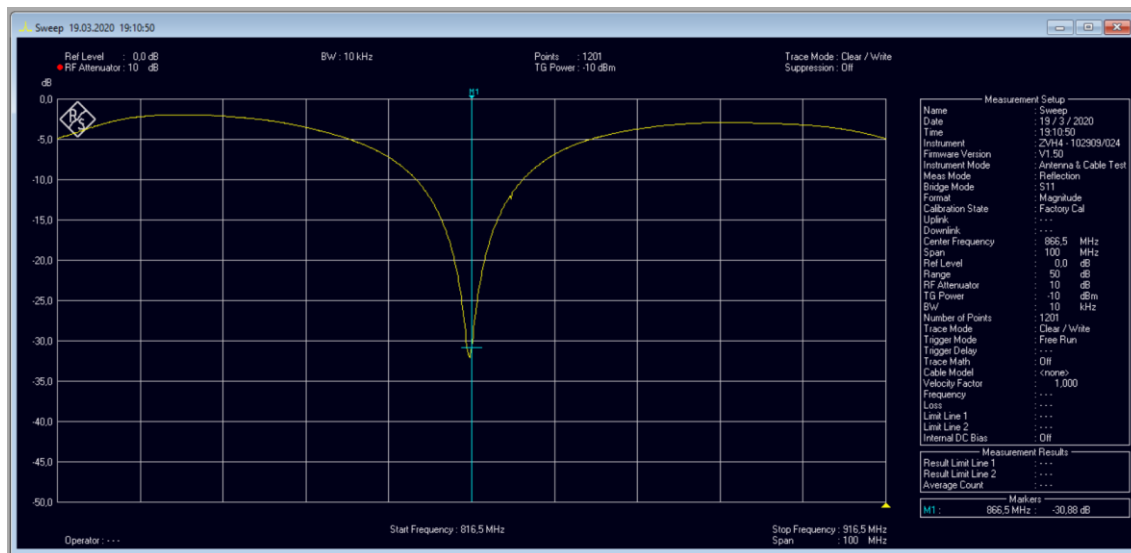
Díky odpozorování vlastností antény při optimalizaci byla vytvořena následující tabulka 4.2 pro rychlou orientaci souvislostí mezi délkou elementů a frekvencí, na které anténa rezonuje. Například při změně délky jednoho segmentu o 3 mm dojde k posunu frekvence, na které anténa rezonuje, o 20 MHz.

Tabulka 4.2: Vliv délky l segmentu na frekvenci antény

Změna délky l segmentu [mm]	Posun frekvence [MHz]
3	20
1	6,667
0,5	3,333
0,25	1,667
0,125	0,833
0,063	0,417
0,031	0,205
0,015	0,1

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

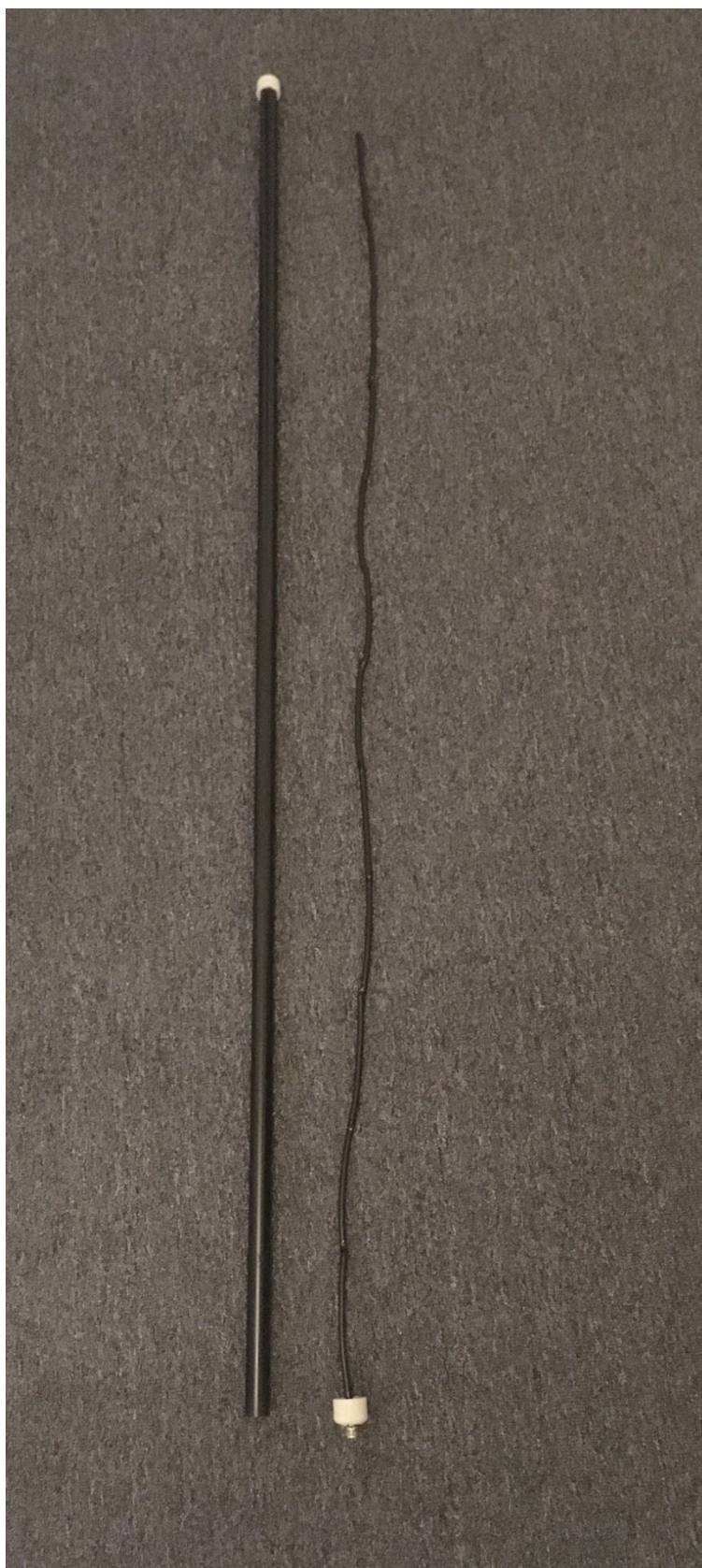
V rámci doladění antény stačilo při posunu frekvence na požadovaný kmitočet vynásobit adekvátní změnu délky l počtem elementů a poslední člen prodloužit o vypočítanou délku. Z praktických důvodů byla vypočítaná délka prodloužení nadsazena a finální ladění antény probíhalo zkracováním elementu.



Obrázek 4.4: Parametr S_{11} po doladění antény

Výsledkem doladění antény, jak lze vidět na obrázku 4.4 výše, je její pracovní kmitočet shodný s požadovanou frekvencí 866,5 MHz a hodnota parametru S_{11} -30,88 dB.

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény



Obrázek 4.5: Realizovaná a doladěná anténa

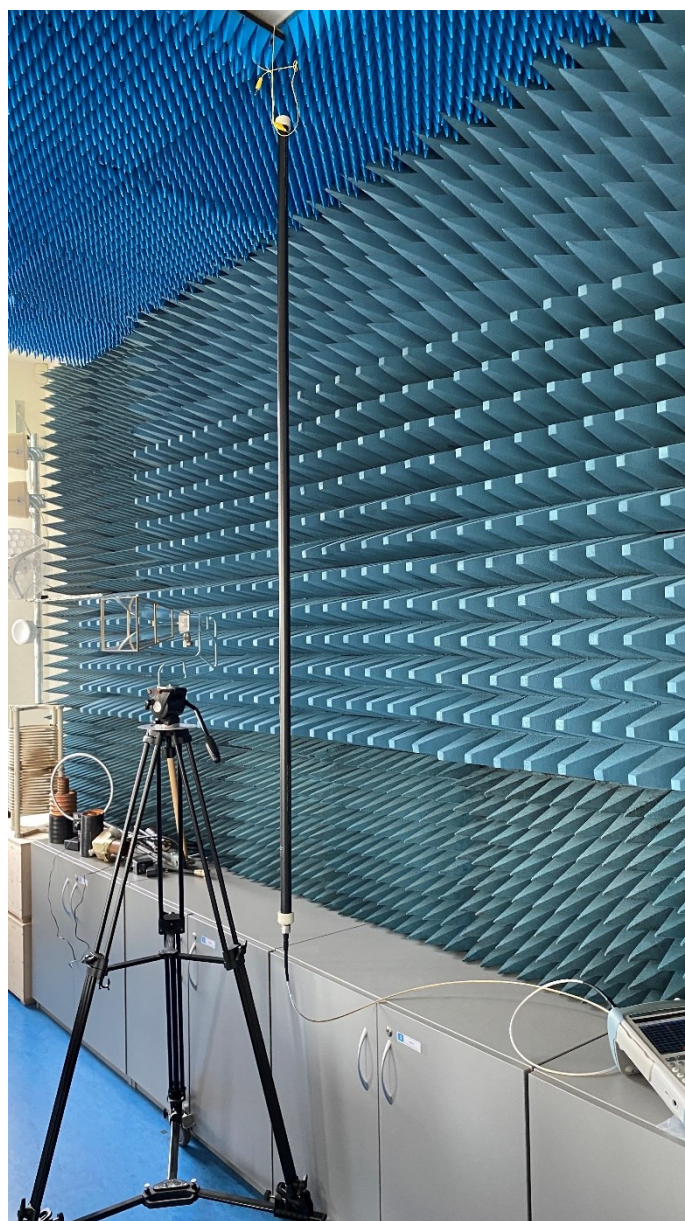
4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

4.2 Ověření vlastností antény

Následujícím krokem je ověření funkčnosti a vlastností antény. Anténa byla odměřena v laboratoři EB209 za použití vektorového obvodového analyzátoru Rhode&Swarzs ZND8 a spektrálním analyzátozem R&S FSH8 substituční metodou.

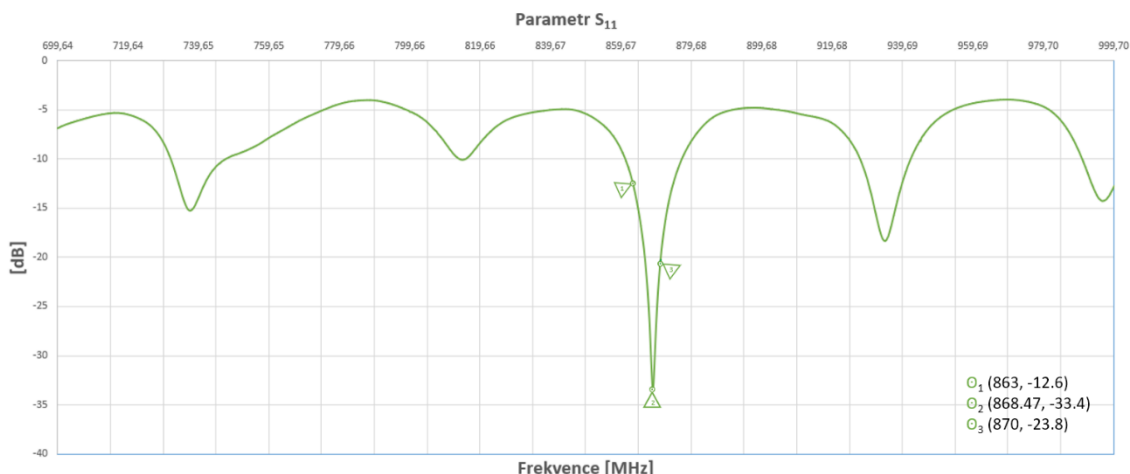
4.2.1 Měření rozptylového parametru S_{11}

Měření naladění antény na pracovní kmitočet proběhlo pomocí rozptylového parametru S_{11} . Byl použit vektorový obvodový analyzátor R&S ZND8, propojený pomocí koaxiálního kabelu se zavěšenou měřenou anténou, jak lze vidět na obrázku 4.6 níže.



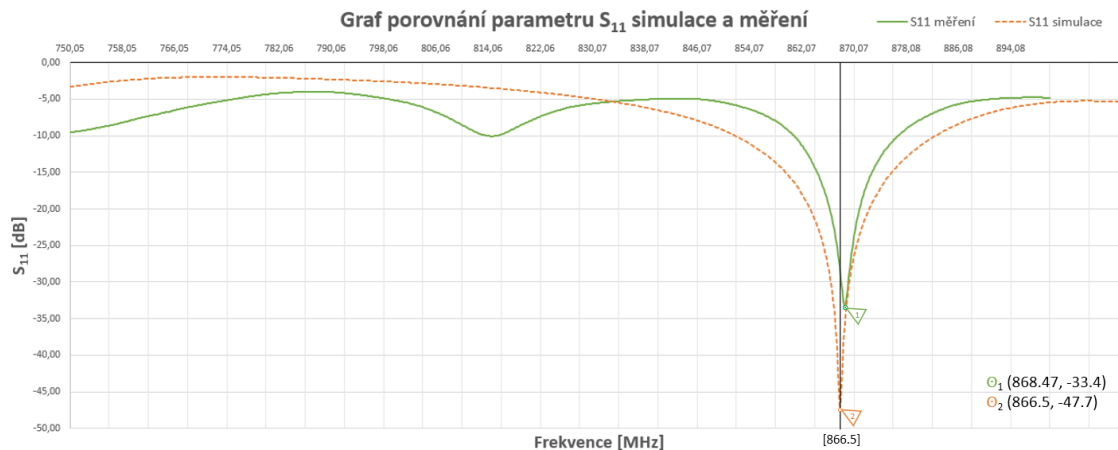
Obrázek 4.6: Průběh měření v laboratoři

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény



Obrázek 4.7: Graf průběh parametru S_{11} naměřený v laboratoři

Z výstupu vektorového obvodového analyzátoru ZND8 naměřeného v laboratoři (obrázek 4.7 výše) lze vidět průběh parametru S_{11} ve frekvenčním rozsahu od 700 do 1000 MHz. V krajní mezi 863 MHz frekvenčního pásma 868 MHz nabývá parametr hodnoty -12,6 dB, poté prudce klesá k největší hodnotě - 33,4 dB (obdobné hodnotě -30,88 dB naměřené při realizaci a doladění antény v domácím prostředí) na frekvenci 868,47 MHz a dále přechází k druhé krajní mezi 870 MHz, kde nabývá hodnoty -23,8 dB. V rozsahu frekvencí 863 až 870 MHz hodnota parametru nestoupá nad -10 dB a je tedy přizpůsobená v celém rozsahu pásma 868 MHz.



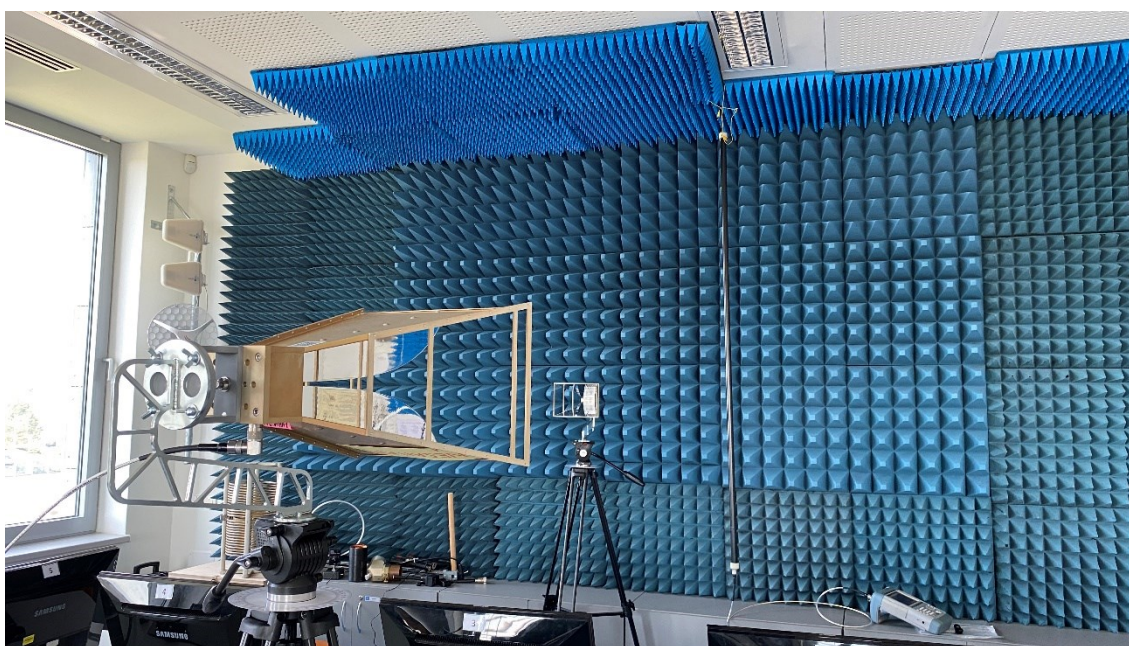
Obrázek 4.8: Graf porovnání průběhu parametru S_{11} při simulaci a měření

Při porovnání naměřených a simulovaných průběhů parametru S_{11} (obrázek 4.8 výše) lze vidět rozdíl mezi největší hodnotou -47,7 dB při simulaci a hodnotou - 33,4 dB z měření. Rozdíl hodnot lze přisuzovat v nedosažení maximální přesnosti při konstrukci modelu a práci programu CST v ideálním prostředí bez vnějších vlivů.

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény

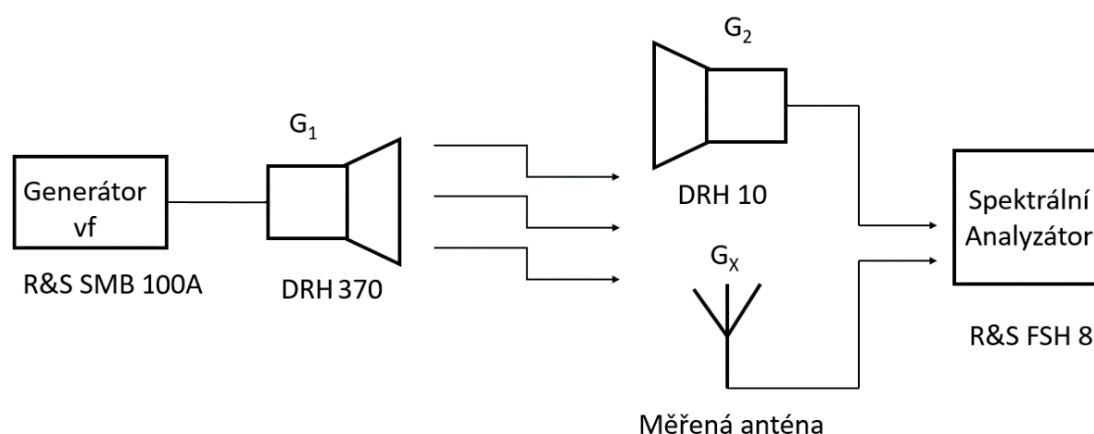
4.2.2 Měření zisku antény substituční metodou

Pro měření substituční metodou platí zákon reciprocity. Nezáleží, zdali je měřená anténa přijímací nebo vysílací. Měřená anténa se spolu s jejím nosným systémem umístí do měřicího prostoru a je vystavena dopadu rovinné elektromagnetické vlny, která má polarizaci odpovídající polarizaci měřené antény. Výstupní výkon antény, dopravený do specifikované zátěže, se srovnává s výkonem substituční referenční antény. Referenční anténu je třeba substitučně umístit do stejného místa, jako byla umístěna měřená anténa. Zisk referenční antény musí být přesně znám, stejně jako její směrovost. Doporučuje se, aby se referenční anténa typem nelišila od antény měřené. Pokud je to možné, je třeba, aby fázové středy obou antén (měřené i referenční) byly při substituci ve stejné poloze.[19]



Obrázek 4.9: Realizace měření zisku substituční metodou

4 Realizace a ověření vlastností kolineární antény



Obrázek 4.10: Schéma zapojení pro měření zisku

Schéma zapojení měřících přístrojů a antén substituční metodou lze vidět na obrázku 4.10 výše. Generátor vf signálu, v našem případě přístroj R&S SMB 100A, generující signál o frekvenci 866,5 MHz, na který je napojena vysílací anténa G_1 , pro účely měření DRH 370. Referenční anténa G_2 (DRH 10) a měřená kolineární anténa G_x propojené koaxiálním kabelem se spektrálním analyzátozem R&S FSH 8.

Výsledný zisk měřené antény je dán vztahem:

$$G_x = P_x(\text{dBm}) - [P_{\text{ref}}(\text{dBm}) - G_2(\text{dBi})] \quad [\text{dBi}] \quad (4.1)$$

Při realizaci měření má referenční anténa G_2 zisk 5,2 dBi, přijímaná úroveň byla $P_{\text{ref}} - 24,8 \text{ dBm}$. U měřené antény nabývala přijímaná úroveň $P_x - 24 \text{ dBm}$.

$$G_x = -24 - [-24,8 - 5,2] = -24 + 30 = 6 \text{ dBi}$$

Po dosazení do vztahu 4.1 získáme výslednou hodnotu zisku měřené antény 6 dBi. Tento zisk je pouze orientační, pro přesné měření by musela být použita bezodrazová komora.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat varianty kolineárních antén. Dalšími body byly návrh kolineární antény a její simulace ve vhodném simulačním programu a samotná realizace antény pracující ve specifickém kmitočtovém pásmu 868 MHz. Funkčnost realizované antény byla ověřena měřením.

Teoretická část práce se zaměřila na úvod do problematiky kolem antén samotných, základních pojmů a dělení, včetně jejich parametrů. Následně byl v druhé kapitole popsán princip činnosti kolineárních antén, vznik a jejich možné varianty.

Hlavní částí práce je praktické využití nabytých teoretických poznatků a popis postupu při realizaci kolineární antény od návrhu přes simulaci modelu až po samotnou konstrukci a ověření funkčnosti antény. Třetí kapitola je tedy zaměřena na návrh včetně výpočtu rozměrů a vytvoření simulace modelu antény v programu CST Studio Suite. V poslední kapitole bylo možné díky výpočtům, simulacím a získaným poznatkům z předchozích kapitol přejít na realizaci antény. Po vyhodnocení prvních výsledků měření vyrobeného modelu bylo třeba anténu doladit. V poslední části kapitoly je správnost návrhu a konstrukce ověřena měřením v univerzitní laboratoři.

Měření z poslední kapitoly ukázalo správnost návrhu antény a díky velmi dobrým výsledkům byla prokázána její funkčnost v daném kmitočtovém pásmu 868 MHz. Odchyly zjištěné při porovnávání simulovaných hodnot a hodnot naměřených lze přisuzovat lidskému faktoru při realizaci modelu a práci programu CST v ideálním prostředí. Hodnota zisku je pouze orientační z důvodu měření v neodrušené místnosti.

Radovan Sahánek

Použitá literatura

- [1] MATUSZCZYK, Jacek. Antény prakticky. 3. české vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 240 s. ISBN 8073001780.
- [2] SVOBODA, Pavel. AEROWEB, Antény a magie kolem nich [online]. 2005 [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/1231-anteny-a-magie-kolem-nich>
- [3] Anonym. Všeobecně o anténách [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://pira.cz/antena.htm>
- [4] PROCHÁZKA, Miroslav. Antény, Encyklopedická příručka. 3. rozšíření vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 384 s. ISBN 8073001667.
- [5] ŠPERLÍN, Miroslav. OK2BUH, Účinnost antény [online]. [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <http://ok2buh.nagano.cz/first/ucinnost.html>
- [6] MAZÁNEK, Miloš a Pavel PECHAČ. Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008, 103 s. ISBN 9788001039977.
- [7] FAJKUS, Radek. Návrh a realizace spirálové antény [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/116199>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Ing. Marek DVORSKÝ, PhD.
- [8] SPÁČIL, Jan. Návrh a realizace zařízení pro měření poměru stojatých vln (PSV). Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Elektrotechnická fakulta. Ing. Tomáš KORÍNEK, PhD.
- [9] ANDERSON, Eric a PHILLIPS, Caleb. Modeling enviromental effects in directionality in wireless networks [online]. 2008 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Sample-directional-antenna-gain-pattern-displayed-on-a-polar-graph_fig1_262366412
- [10] KARADIMAS, Nikolaos a PAPASTAMATIOU, Nikolaos. A Military Real Time Locating System Installation and Utilization Approach [online]. 2008 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Omni-Directional-Antenna_fig5_270276150
- [11] HERESS, David. Bandwidth basics and fundamentals [online]. 2019 [cit. 24. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.testandmeasurementtips.com/bandwidth-basics-and-fundamentals/>
- [12] POLÍVKA, Milan. HOLUB, Alois a MAZÁNEK, Miloš. Collinear Microstrip Patch Antenna. Radioengineering. 2005, vol. 14, č. 4, s. 40-42. ISSN 1210-2512

- [13] POLIVKA, Milan a HOLUB, Alois. Collinear and Coparallel Principles in Antenna Design [online]. Praha, 2007. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267305152_Collinear_and_Coparallel_Principles_in_Antenna_Design
- [14] POT, Martin. Home-brew Compact 6dBi Collinear Antenna [online]. 2013 [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <https://martybugs.net/wireless/collinear.cgi>
- [15] JAVŮREK, František. RADIOWORLD – OK2FJ, Kolineární anténa [online]. [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <http://www.radio-foto.eu/radio/kolinear.php>
- [16] FCC PS. Rub technický magazín, Antény pro WIFI – 1. část [online]. [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <http://www.fccps.cz/rub-technicky-magazin/anteny-pro-wifi-1-cast#title>
- [17] LÉNART, Ferenc a NAGY, Lajos. Antennas, Radiowave propagation, Mobile systems [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://home.hvt.bme.hu/~nagy/projects.htm>
- [18] POLIVKA, Milan. Návrh a Konstrukce Antén [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68679484-Navrh-a-konstrukce-anten.html>
- [19] PROCHÁZKA, Miroslav. Měření elektrických parametrů antén [online]. Amatérské rádio pro Konstruktery, 1999 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://om6bb.bab.sk/files/HAM%20Kniznica/Magaziny/Amaterske%20radio%20pro%20Konstruktery/1999-02a.pdf>

Seznam příloh

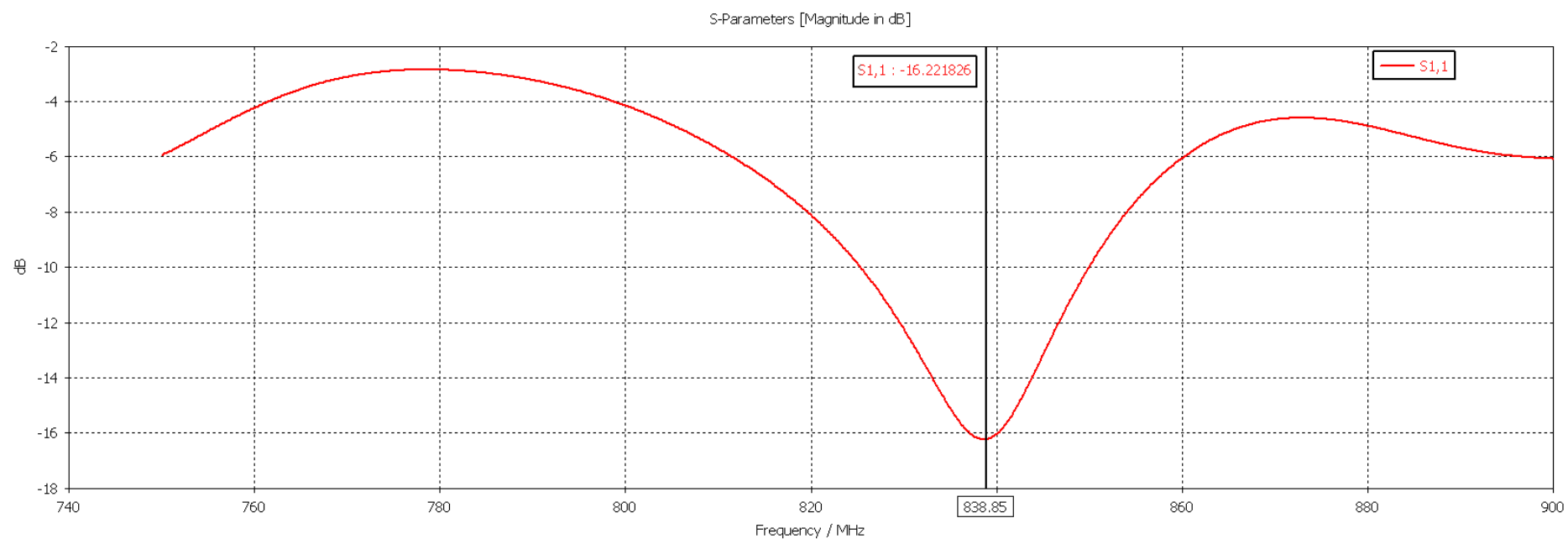
Příloha A:	Obsah elektronické přílohy.....	II
Příloha B:	Simulace antény – průběhy jednotlivých závislostí.....	III
Příloha B. 1:	Frekvenční závislost parametru S_{11} před optimalizací.....	III
Příloha B. 2:	Frekvenční závislost parametru S_{11} po optimalizaci.....	IV
Příloha B. 3:	Parametr S_{11} v závislosti na funkci Parametr Sweep.....	V
Příloha B. 4:	Výsledná hodnota parametru S_{11}	VI
Příloha B. 5:	Výsledná hodnota poměru stojatých vln VSWR.....	VII
Příloha C:	Model antény v CST.....	VIII
Příloha C. 1:	Detail napojení elementů.....	VIII
Příloha C. 2:	Detail průměrů koaxiálního kabelu.....	VIII
Příloha C. 3:	Okótovaný model antény s krytem.....	IX
Příloha D:	Realizovaná anténa.....	X
Příloha E:	Ověření parametrů antény.....	XI
Příloha E. 1:	Graf průběh parametru S_{11} naměřený v laboratoři.....	XI
Příloha E. 2:	Graf porovnání parametru S_{11} při simulaci a měření.....	XII

Příloha A: Obsah elektronické přílohy

Obsah elektronické přílohy:

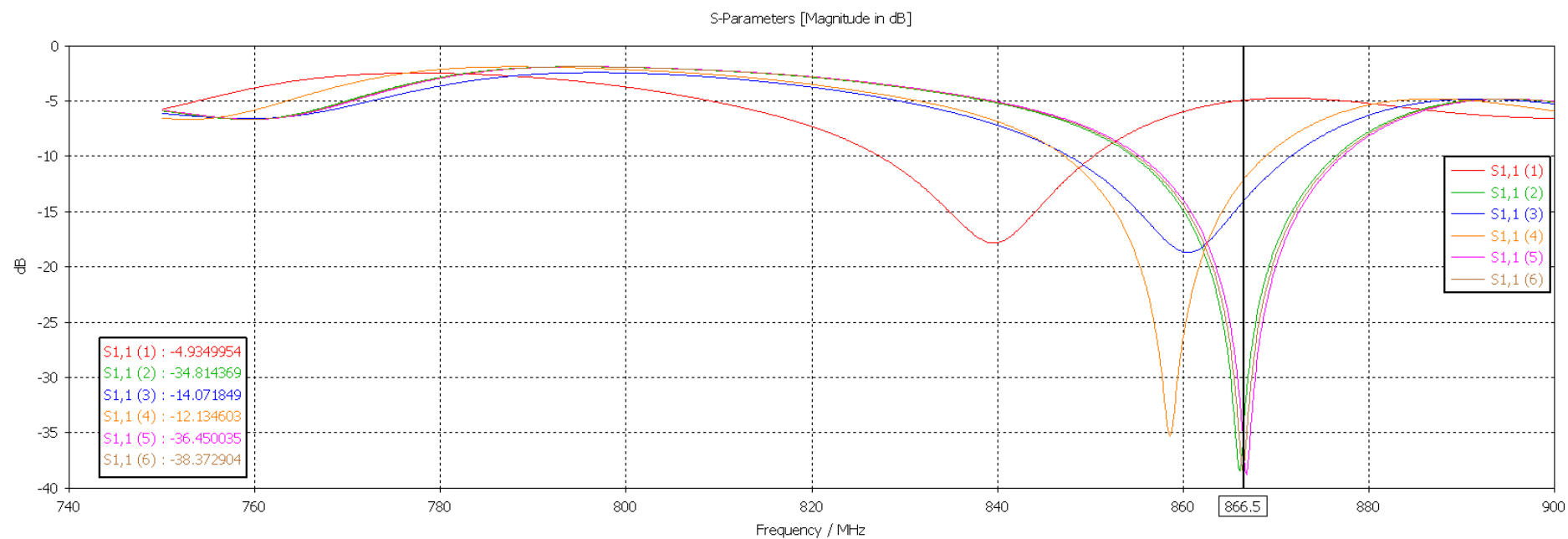
- coco868.cst,
- s11merene.csv,
- s11simulace.txt,

Příloha B: Simulace antény – průběhy jednotlivých závislostí



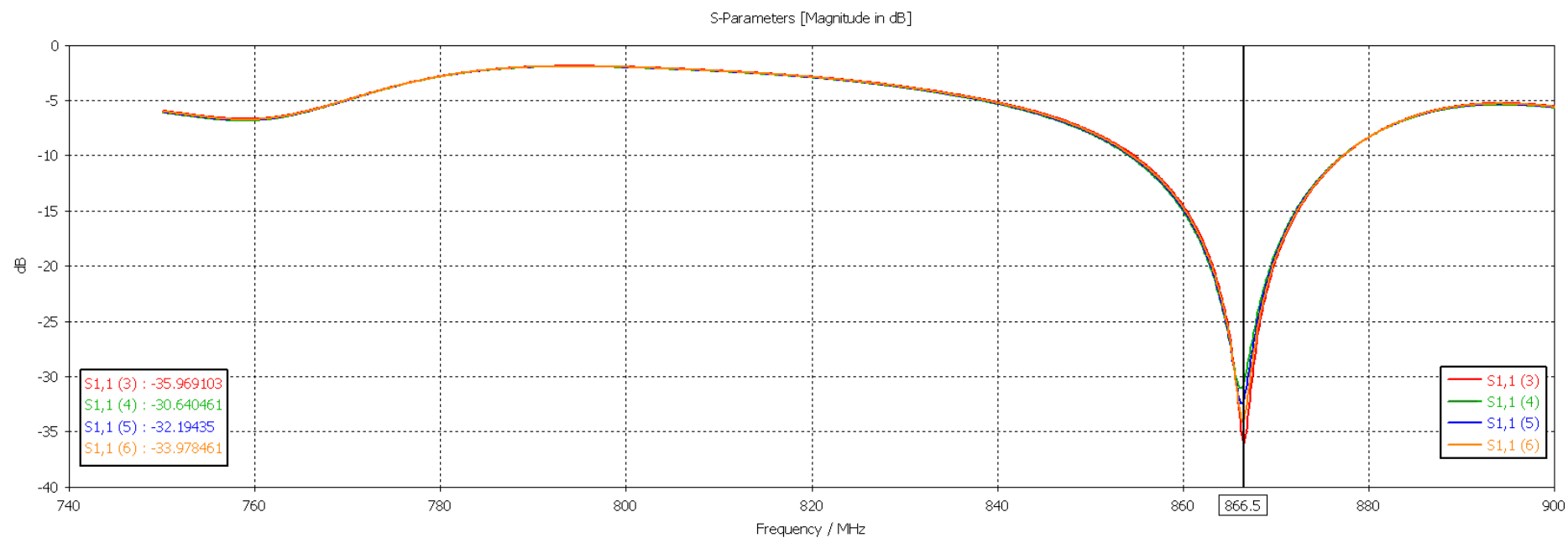
Příloha B. 1: Frekvenční závislost parametru S_{11} před optimalizací

Příloha B: Simulace antény – průběhy jednotlivých závislostí



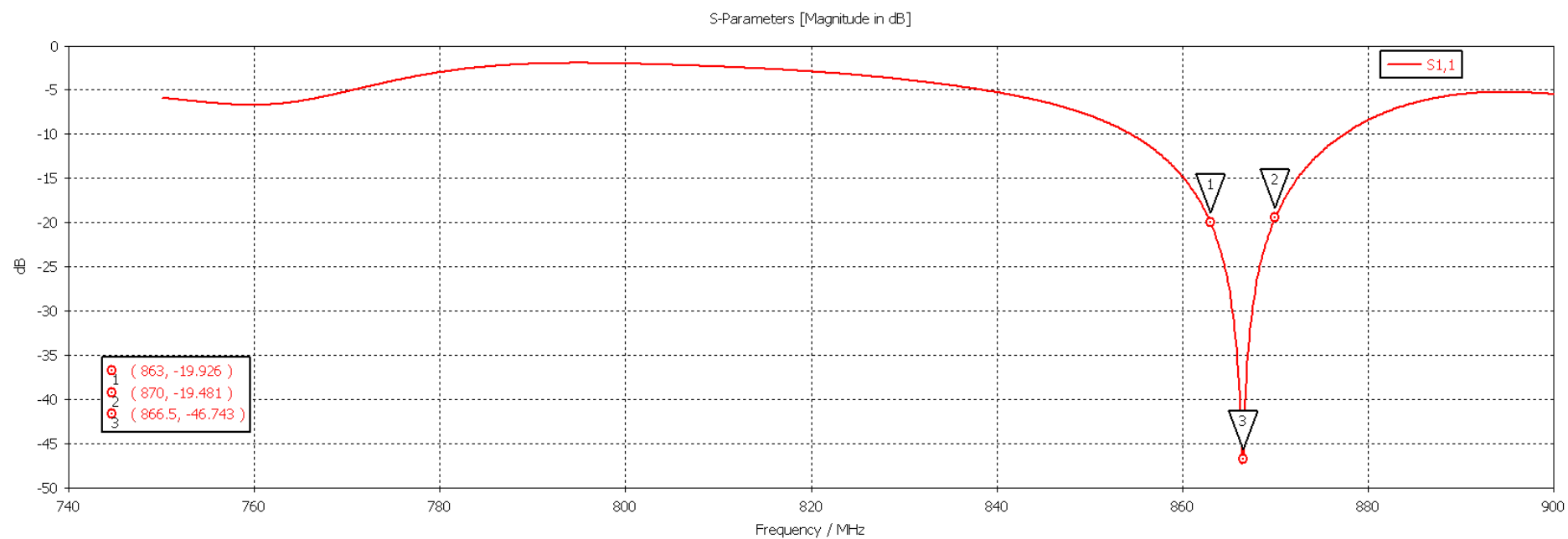
Příloha B. 2: Frekvenční závislost parametru S_{11} po optimalizaci

Příloha B: Simulace antény – průběhy jednotlivých závislostí



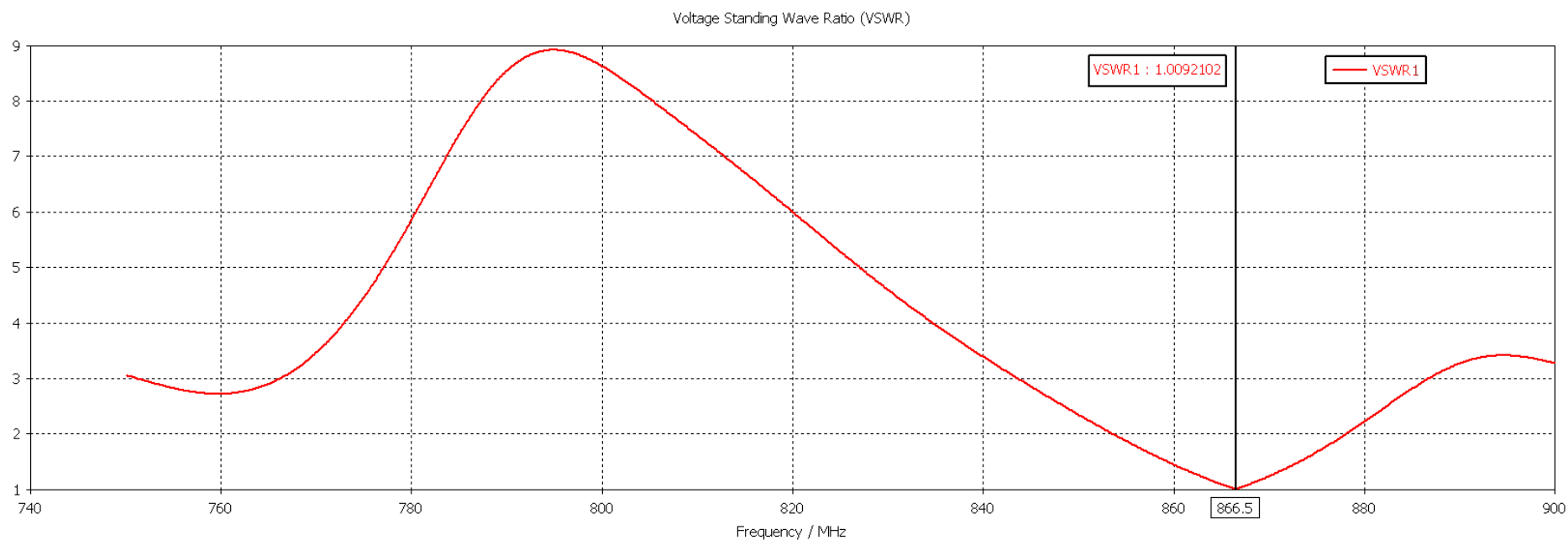
Příloha B. 3: Parametr S_{11} v závislosti na funkci Parametr Sweep

Příloha B: Simulace antény – průběhy jednotlivých závislostí



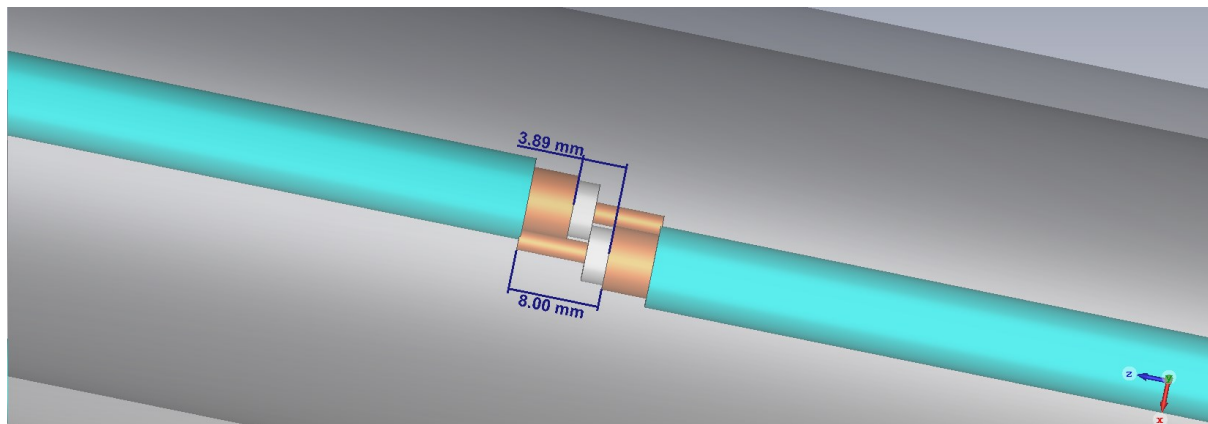
Příloha B. 4: Výsledná hodnota parametru S_{11}

Příloha B: Simulace antény – průběhy jednotlivých závislostí

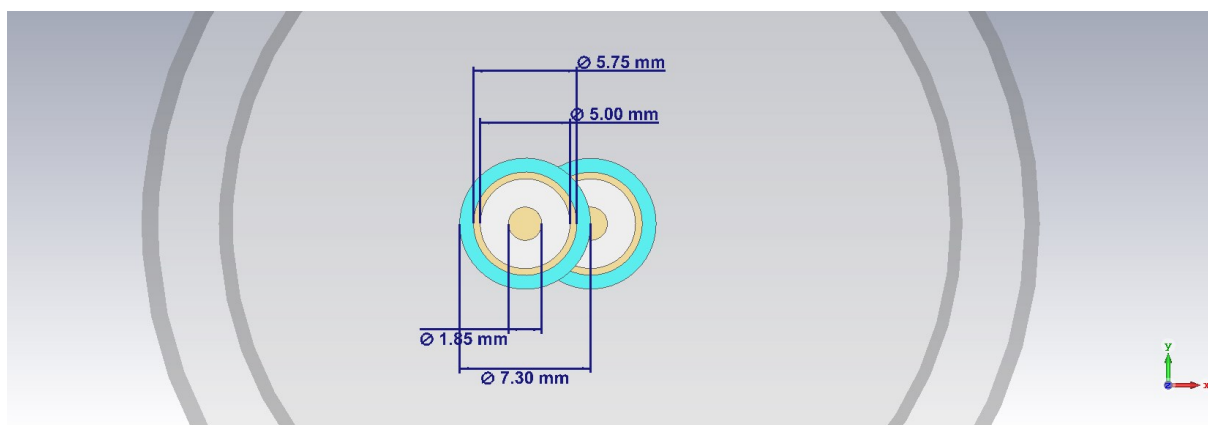


Příloha B. 5: Výsledná hodnota poměru stojatých vln VSWR

Příloha C: Model antény v CST

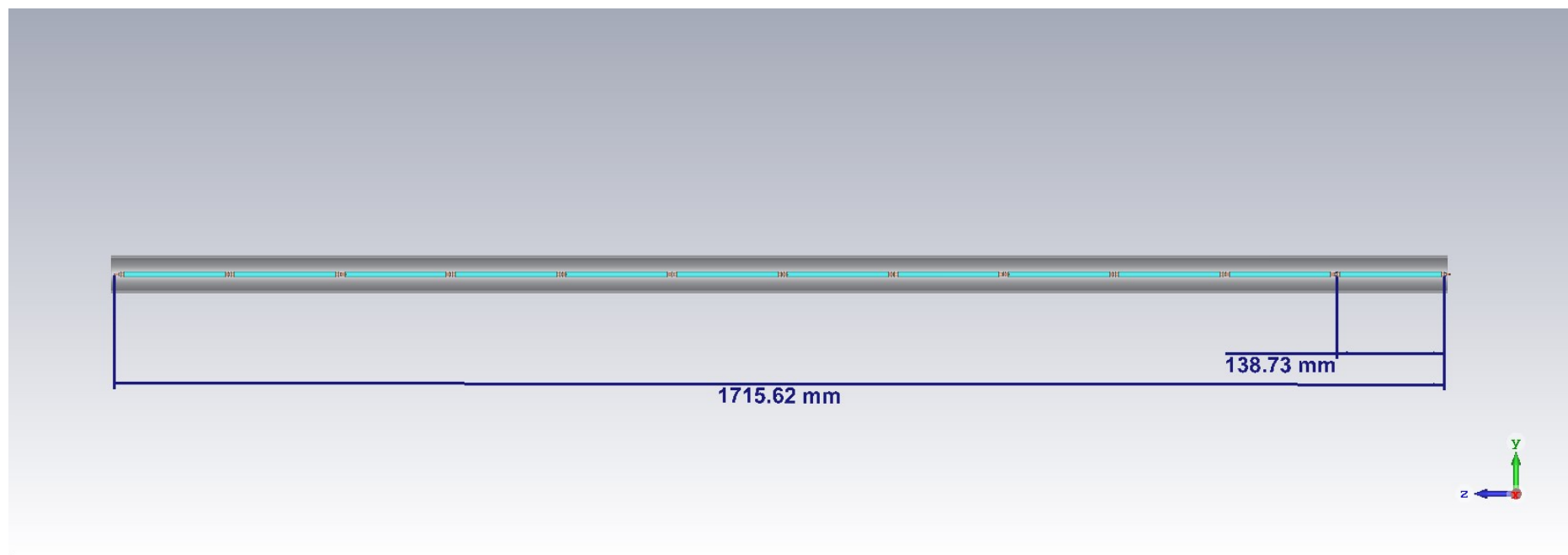


Příloha C. 1: Detail napojení elementů



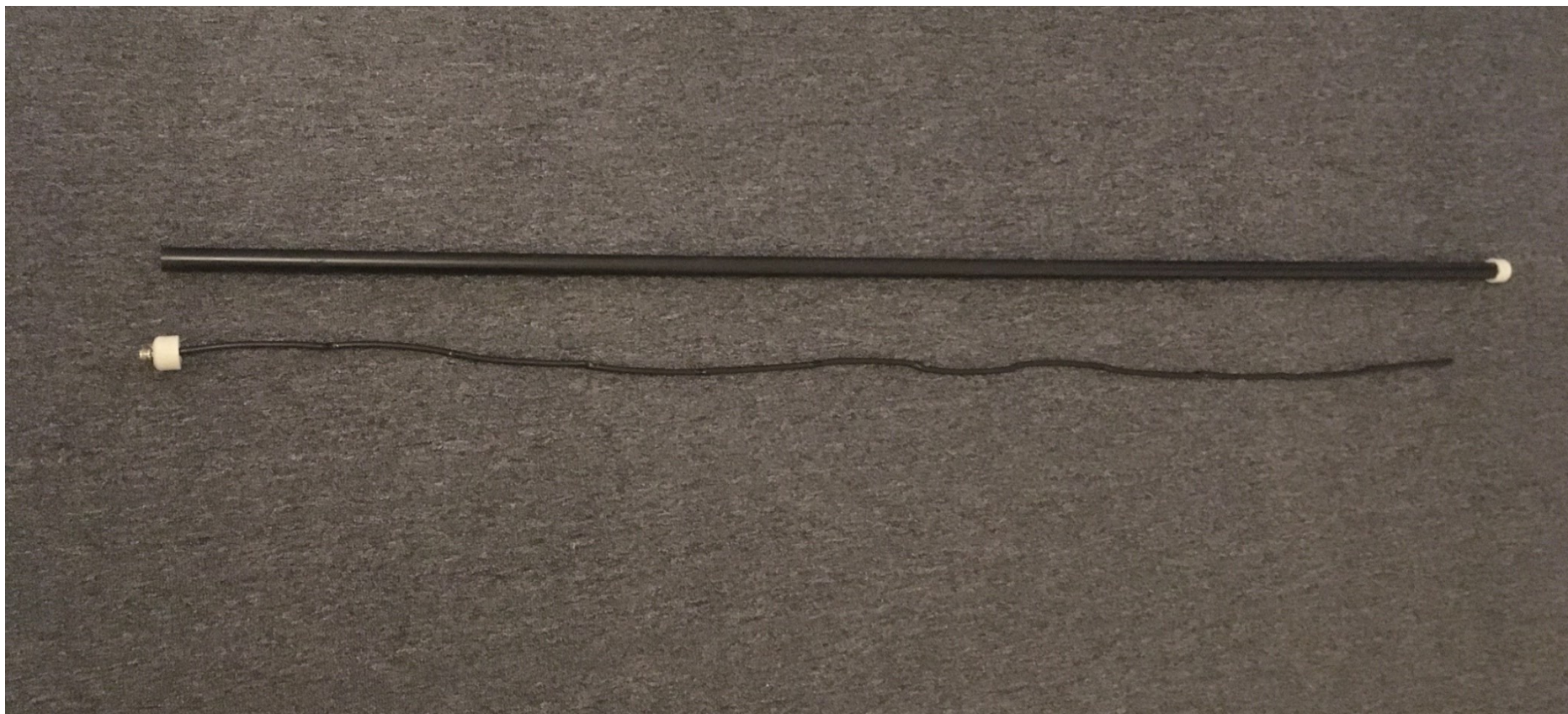
Příloha C. 2: Detail průměrů koaxiálního kabelu

Příloha C: Model antény v CST



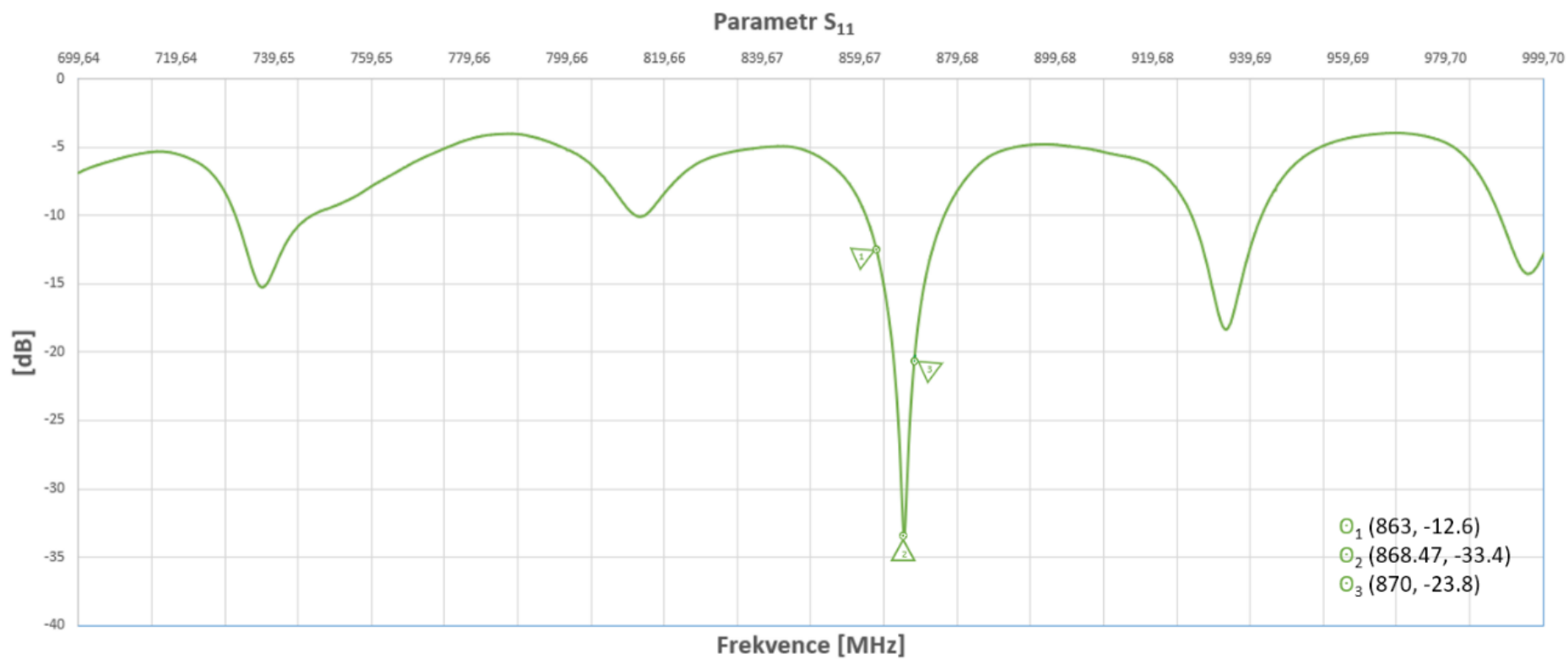
Příloha C. 3: Okótovaný model antény s krytem

Příloha D: Realizovaná anténa



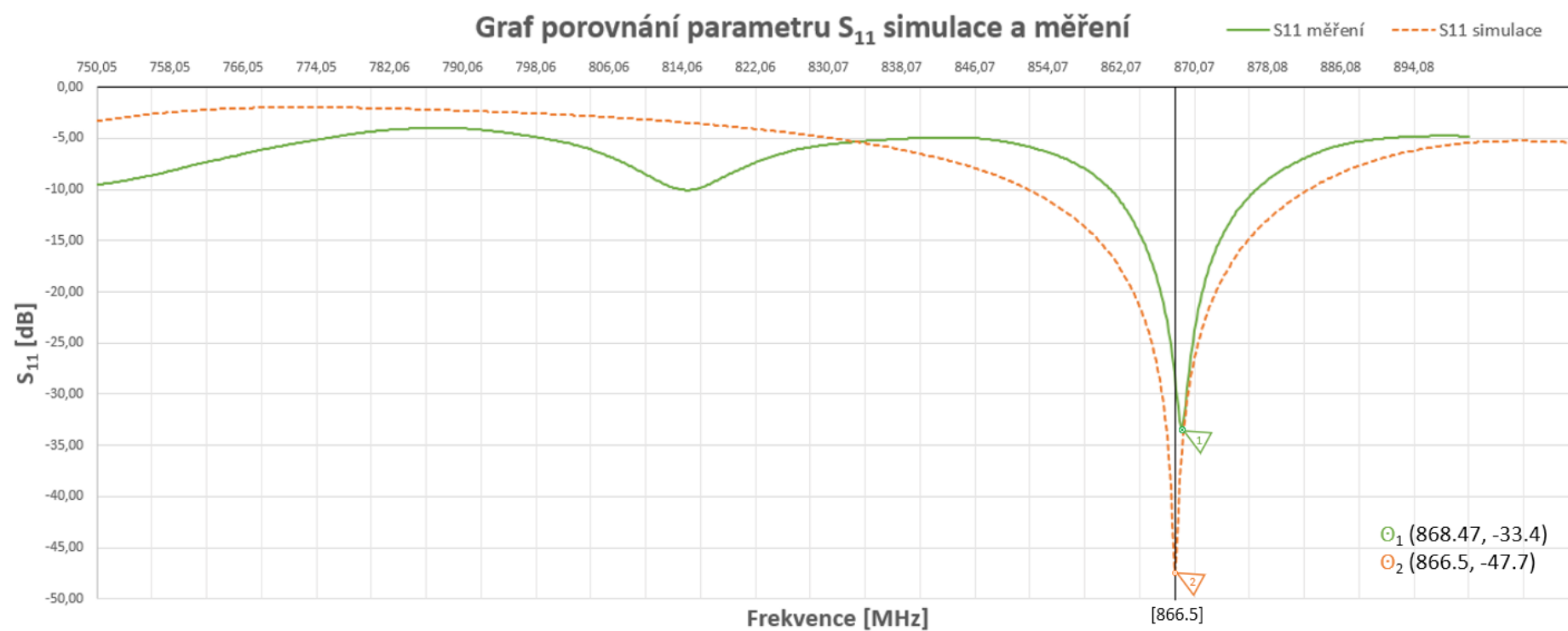
Příloha D: Realizovaná a doladěná anténa

Příloha E: Měření parametrů antény



Příloha E. 1: Graf průběh parametru S_{11} naměřený v laboratoři

Příloha E: Měření parametrů antény



Příloha E. 2: Graf porovnání parametru S_{11} při simulaci a měření